

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky – K354

Konstrukce exoskeletonu pro rehabilitaci horních končetin

Construction of Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation

Student:

Bc. Radim Strejček

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Kárník, CSc.

Ostrava 2018

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radim Strejček**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T013 Robotika  
Téma: **Konstrukce exoskeletonu pro rehabilitaci horních končetin**  
**Construction of Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Proved'te analýzu současného stavu a navrhnete varianty řešení možných koncepcí exoskeletonu pro rehabilitaci horních končetin.
2. Proved'te výběr optimální varianty.
3. Konstrukční návrh vybrané varianty podrobně rozpracujte dle pokynů vedoucího s využitím CAD systému Creo.
4. Výkresovou dokumentaci zpracujte dle pokynů vedoucího.
5. Vypracujte technickou zprávu s potřebnými výpočty a zhodno'te dosažené výsledky.
6. Závěr.
7. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu editoru MSWORD, PDF a konstrukční řešení v CAD systému (podle pokynu vedoucího).

### Seznam doporučené odborné literatury:

KÁRNÍK, L. *Servisní roboty*. VŠB-TU Ostrava, 2004. 144 s. ISBN 80-248-0626-6.

KÁRNÍK, L. - KNOFLÍČEK, R. - MARCINCIN, J. N. *Mobilní roboty*. Opava: MÁRFY SLEZSKO, 2000. 210 s. ISBN 80-902746-2-5.

MENZEL, P. - D'ALUSIO, F. *Robo sapiens: evolution of a new species*. USA, New York, 2000. 239 p. ISBN 0-262-13382-2.

SKARUPA, J. - MOSTÝN, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. Košice: Vienaľa Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0.

KOLÍBAL, Z a kol. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. I. vydání. Havlíčkův Brod: VUTIMUM, 2016, 786 s. ISBN 978-80-214-4828-5.

KÁRNÍK, L. - MARCINCIN, J. N. *Biorobotická zařízení*. Opava: MÁRFY SLEZSKO, 1999. 184 s. ISBN

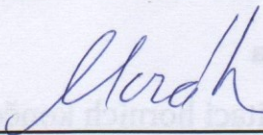


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

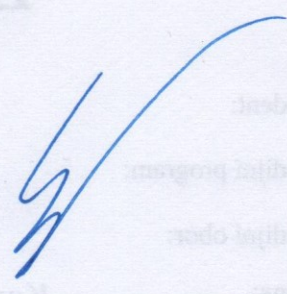
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ladislav Kárník, CSc.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

  
prof. Dr. Ing. Petr Novák  
vedoucí katedry



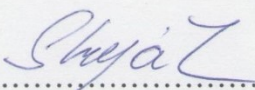
  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5.2018



.....

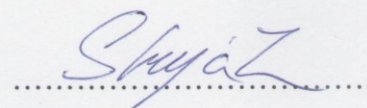
Podpis Studenta



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15.05.2018



Podpis Studenta

Jméno a příjmení autora práce: Radim Strejček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Heřmanická 1416/10, Slezská Ostrava, 710 00

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

STREJČEK, R. *Konstrukce exoskeletonu pro rehabilitaci horních končetin :diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky, 2018, 60 s. Vedoucí práce: Kárník, L.

Diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce exoskeletonu pro rehabilitaci horních končetin. Rehabilitace se soustředí na oblast zápěstí a prstů. Na začátku práce jsou rozebrány druhy a provedení různých typů ortéz, základy kinematiky horních končetin, včetně rozsahů pohybu zkoumané oblasti a stručné vysvětlení problematiky spasticity, na jejíž léčbu se exoskeleton zaměřuje.

Na základě požadavkového listu je navržena optimální varianta, na kterou byly provedeny výpočty pro pohonné ústrojí. Zpráva také obsahuje návrh zapojení řídicích komponent a je doplněna o výkresovou dokumentaci vybraných sestav a podsestav.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

STREJČEK, R. *Construction of exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2018, 60 p. Thesis head: Kárník, L.

The master thesis represents construction of exoskeleton for upper limbs. The focus is on the area of wrist and fingers. In the beginning of the work there are mentioned and explained types and designs of various types of braces, the basics of kinematic of the upper limbs, including range of motions in the examined area. Also there is a brief explanation of spasticity, in which treatment is this thesis focused on.

Following a request list, the optimal variant is designed and calculated for its drive mechanism. The project also contains design of connection of control components with addition of drawing documentation of selected assemblies and subassemblies.

### Klíčová slova:

Exoskeleton, WHO, ortéza, zápěstí, ruka, rehabilitace, 3D tisk, prst

### Keywords:

Exoskeleton, WHO, Orthosis, wrist, hand, rehabilitation, 3D print, finger,

# 1 Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	9
Slovník termínů .....	11
Úvod .....	12
1 Rešerše .....	13
1.1 Základy ortotiky horních končetin.....	13
1.1.1 Rozdělení dle funkčního účinku ortéz.....	13
1.1.2 Rozdělení dle konstrukce .....	13
1.1.3 Rozdělení dle zhotovení .....	14
1.1.4 SCS klasifikační systém .....	14
1.2 Základy kinematiky HK v oblasti zápěstí.....	16
1.2.1 Rozsahy pohybu .....	16
1.3 Spasticita a její léčba .....	16
1.3.1 Definice .....	16
1.3.2 Terapeutická léčba.....	17
1.4 Analýza současných systémů .....	18
1.4.1 DAHO .....	18
1.4.2 Saebo .....	18
1.4.3 Gloreha Workstation .....	19
1.4.4 Rapael.....	19
2 Požadavkový list .....	20
3 Návrh řešení .....	21
3.1 Konstrukce kloubu zápěstí.....	21
3.1.1 Kulový kloub.....	21
3.1.2 Dva lineární pohony .....	22
3.2 Konstrukce a pohon prstu .....	23
3.2.1 S pevnými rameny.....	23

3.2.2	S lanovým táhlem.....	24
3.3	Volba pohonu .....	25
3.3.1	Elektrický .....	25
3.3.2	Pneumatický .....	25
3.3.3	SMA wire .....	26
3.4	Optimální varianta .....	26
4	Konstrukce kloubu zápěstí .....	27
4.1	Rozsahy pohybu v zápěstí .....	30
4.2	Návrh pohonu pro pohyb zápěstí.....	32
4.3	Konstrukce převodového ústrojí pro zápěstí .....	33
5	Konstrukce prstů .....	37
5.1	Návrh pohonu pro pohyb prstů .....	40
5.2	Konstrukce převodového ústrojí pro prsty .....	42
6	Kompletní WHO .....	44
7	Box .....	45
8	Výroba.....	47
8.1	Nastavení jednotlivých dílu .....	47
9	Rozpis komponentů.....	49
9.1	Rukavice .....	49
9.2	Teflonová hadice PTFE 4x2,5mm.....	49
9.3	Šroubení se závitem přímé TPC04-M5 .....	49
9.4	Ocelové lanko .....	50
9.5	Trapézový šroub TR8x8 .....	50
9.6	Matice s přírubou T8x8 .....	50
9.7	Optický senzor.....	50
9.8	Motor .....	50
9.9	L298N H můstek .....	51
9.10	Napájecí modul 3 – 40 V / 3A (Step-down) .....	51



9.11	Napájecí adaptér síťový 9V 60mA [27].....	51
9.12	Arduino Mega 2560 .....	52
9.13	Joystick PS .....	52
9.14	Kolébkový spínač P-SM101-1B3 [30].....	52
9.15	Nepájivé kontaktní pole ZY-60 [31].....	52
10	Schéma zapojení.....	53
11	Rozpočet.....	54
12	Závěr.....	55
13	Seznam obrázků .....	56
14	Seznam tabulek .....	57
15	Seznam použité literatury.....	58
16	Seznam příloh.....	60

## Seznam použitých značek a symbolů

Mk	Potřebný kroutící moment	[ Nmm ]
Mkw	Kroutící moment na zápěstí	[ Nmm ]
Mkg	Kroutící moment v převodovce	[ Nmm ]
Mkm	Kroutící moment motoru	[ Nmm ]
Mk_1f	Kroutící moment jednoho prstu	[ Nmm ]
rw	Rameno působení síly na zápěstí	[ mm ]
rg	Rameno působení síly v převodovce	[ mm ]
r1	Rameno působení síly mezi články prstu	[ mm ]
r2	Rameno působení síly v kořeni prstu	[ mm ]
r3	Rameno působení síly mezi články palce	[ mm ]
F	Síla působící na šroub	[ N ]
F_1f	Síla na jednom prstu	[ N ]
F_5f	Síla na pěti prstech	[ N ]
Fo	Obvodová síla na šroubu	[ N ]
i	Převodový poměr	[ - ]
im	Převodový poměr na motorové převodovce	[ - ]
n	Otáčky motoru	[ 1/min ]
ng	Otáčky převodového ústrojí	[ 1/min ]
n1	Počet otáček potřebných na potřebný posuv	[ - ]
n2	Počet otáček potřebných na potřebný posuv	[ - ]
nm1	Potřebný počet otáček na motoru	[ - ]
nm2	Potřebný počet otáček na motoru	[ - ]
nm	Otáčky motoru	[ 1/min ]
P	Stoupání závitu	[ mm ]
Pm	Výkon motoru	[ W ]
S	Kritický průřez šroubu	[ mm <sup>2</sup> ]
s	Celková vzdálenost posuvu lanka	[ mm ]
s1	První vzdálenost posuvu lanka	[ mm ]
s2	Druhá vzdálenost posuvu lanka	[ mm ]
sp	Velikost posuvu lanka u palce	[ mm ]



$v$	Rychlost posuvu lanka	[ mm/s ]
$t$	Celkový čas posuvu lanka	[ s ]
$t_1$	Čas 1. posuvu	[ s ]
$t_2$	Čas 2. posuvu	[ s ]
$L_f$	Rameno působení síly v kořeni prstu	[ mm ]
$D, d_2, d_3$	Rozměry závitu	[ mm ]
$f$	koeficient smykového tření mezi závity	[ - ]
$\alpha$	Úhel natočení flexe a extenze zápěstí	[ ° ]
$\alpha_g$	Potřebný úhel natočení disku převodového ústrojí	[ ° ]
$\beta$	Velikost natočení radiální a ulnární deviace	[ ° ]
$\beta_g$	Úhel natočení převodovky	[ ° ]
$\omega$	Úhlová rychlost	[ rad/s ]
$\omega_{dov}$	Maximální dovolená úhlová rychlost	[ rad/s ]
$\omega_p$	Úhlová rychlost palce	[ rad/s ]
$\gamma$	Úhel stoupání závitu	[ ° ]
$\Phi$	Třecí úhel	[ ° ]
$\sigma_{Dd}$	Dovolené napětí v tlaku	[ MPa ]

## Slovník termínů

**Exoskeleton** je vnější obal organismu, sloužící k jeho ochraně nebo k rozšíření jeho fyzických vlastností.

**DOF** z anglického výrazu Degree of freedom, tedy stupně volnosti daného mechanismu.

**Ortotika** je specializovaný obor ortopedické protetiky, využíváný k ovlivnění morfologických nebo funkčních poruch nervového, svalového nebo skeletálního systému (evropská norma ISO 8549). [1]

**Ortéma** je technická pomůcka k zevní aplikaci ortotiky.

**SCS** z anglického výrazu Splint Classification System, který byl stanoven roku 1989 společností American Society of Hand Therapists, slouží k mezinárodnímu klasifikování ortéz.

**WHO** z anglického wrist hand orthosis, zkratka pro oblast ruky, které se ortéma věnuje. V tomto případě zápěstí a ruka.

**Bowden** je typ kabelu, umožňující přenos mechanické síly. Je složen z pružného vedení, ve kterém je obvykle ocelové lanko. Nejrozšířenější použití je v cyklistice pro pohon brzd.



## Úvod

Tak jako se robotika rozmáhá napříč různými obory, ať už v průmyslu, zemědělství, ostraze nebo armádě, je její obrovská část aplikovaná také ve zdravotnictví. V tomto odvětví je kladen obrovský důraz především na přesnost, čistotu ale také na pokrok, který zdravotnictví díky robotice zažívá.

Tato práce se zabývá návrhem exoskeletonu pro rehabilitaci horních končetin. Kde samotný pojem rehabilitace, tedy obnovení je základním kamenem pro návrh exoskeletonu. Od obnovení funkce nehybného zápěstí, přes umožnění chůze lidem bez noh, až po plné zotavení jakéhokoliv fyzického postižení.

U rehabilitačních zařízení je obrovský problém v ceně a celkové mohutnosti těchto systému. Důvodem je zejména technologická náročnost a legislativa potřebná pro schválení k léčebným účelům. Z těchto důvodů jsou rehabilitační zařízení umístěna především v léčebných střediscích, kde pacienti docházejí v časových intervalech po určitou dobu v závislosti na velikosti jejich postižení, což většinou nemá dostatečné účinky pro plné zotavení.

Právě omezená dostupnost těchto zařízení byla největší výzvou pro vypracování rehabilitačního zařízení, které má potenciál dostat se ke každému pacientovi domů a pomoci mu v obnovení kvality jeho života.

# 1 Rešerše

## 1.1 Základy ortotiky horních končetin

Pravidlo 4C – Comfort, Control, Cosmesis, Cost

### 1.1.1 Rozdělení dle funkčního účinku ortéz

Fixace – způsobuje fixní zachycení dané polohy

Limitace – umožňuje plně zafixovat, nebo vymezit rozsah pohybu

Korekce – slouží k vyrovnávání nevhodné polohy kloubu

Stabilizace – slouží k zabránění nefyziologického pohybu

Odlehčení – uvolňuje napětí v poškozené částí, např. pooperační použití

Kompenzace – náhrada nedostatečné úchopové funkce ruky

Jiné

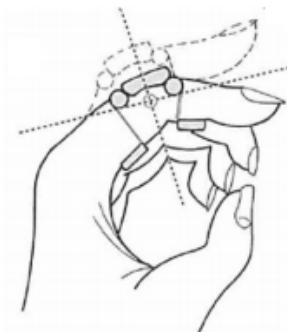
### 1.1.2 Rozdělení dle konstrukce

Statická – slouží k pevnému zafixování končetiny. Použití např. zlomenina, záněty (Obr. 1)

Dynamická – slouží ke stabilizaci nebo limitaci pohybu. (Obr. 2)



Obr. 1 Statická ortéza [7]



Obr. 2 Dynamická ortéza [7]



### 1.1.3 Rozdělení dle zhotovení

Sériová - Zejména pro lehčí poranění

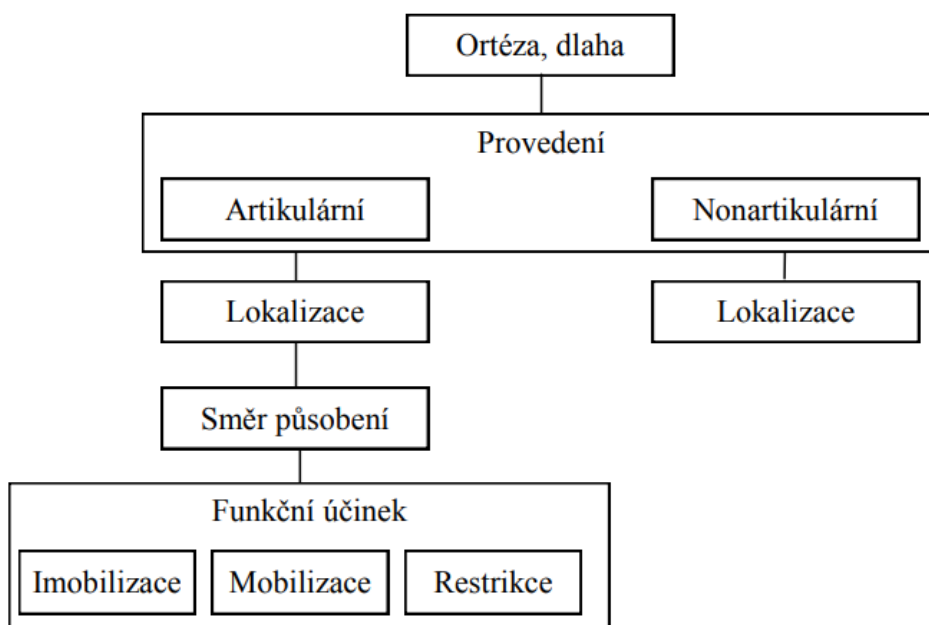
Individuální – Pro komplikovanější poranění, nebo při nedostatečnosti sériové ortézy.

### 1.1.4 SCS klasifikační systém

Klasifikace ortéz dle tohoto systému spočívá v těchto bodech :

1. Provedení
2. Lokalizace
3. Směr působení
4. Funkční účinek ortézy

Pro lepší názornost se udávají do schématu SCS viz. Obr. 3.



Obr. 3 Schéma klasifikačního systému SCS [7]

Provedení:

Artikulární – ovlivňuje funkci alespoň jednoho kloubu

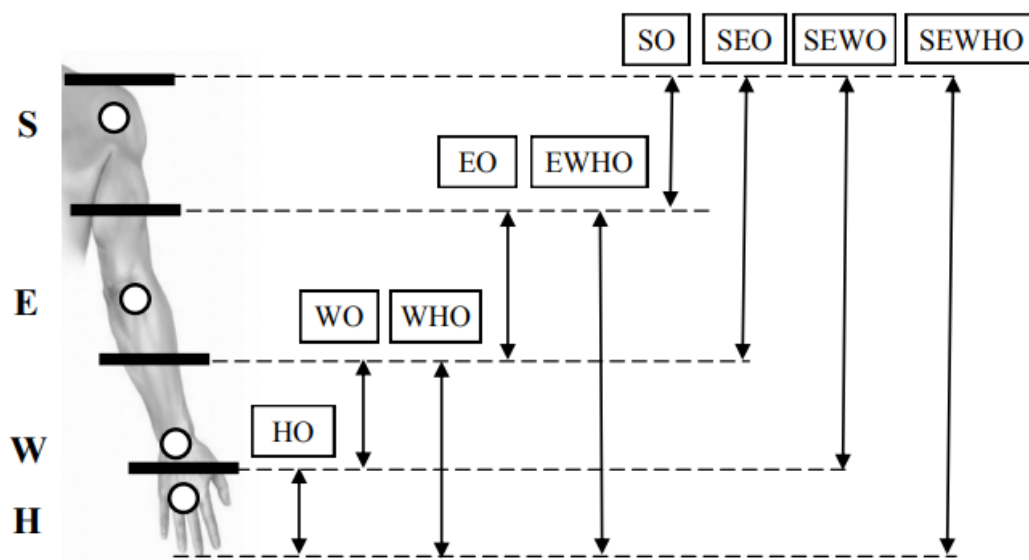
Nonartikulární – pro mezi kloubní část končetiny

## Lokalizace

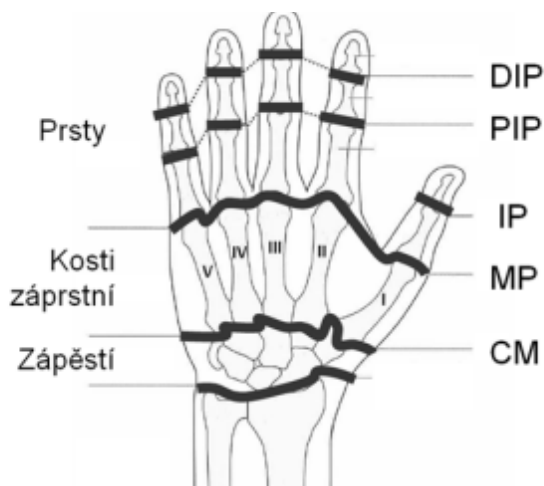
Dle mezinárodní normy ISO 8549-3:1989 označujeme ortézu podle kloubů, které zahrnuje

- S (Shoulder) – kloub ramenní
- E (Elbow) – kloub loketní
- W (Wrist) – kloub zápěstní
- H (Hand) – klouby ruky
- F (Finger) – klouby prstů

Pro příklad SO znamená Shoulder Orthosis, SEWHO znamená Shoulder Elbow Wrist Hand Orthosis, tedy celou horní končetinu viz Obr. 4.



Obr. 4 Lokalizace ortéz HK [7]



Obr. 5 Lokalizace kloubu ruky [7]

## 1.2 Základy kinematiky HK v oblasti zápěstí

### 1.2.1 Rozsahy pohybu

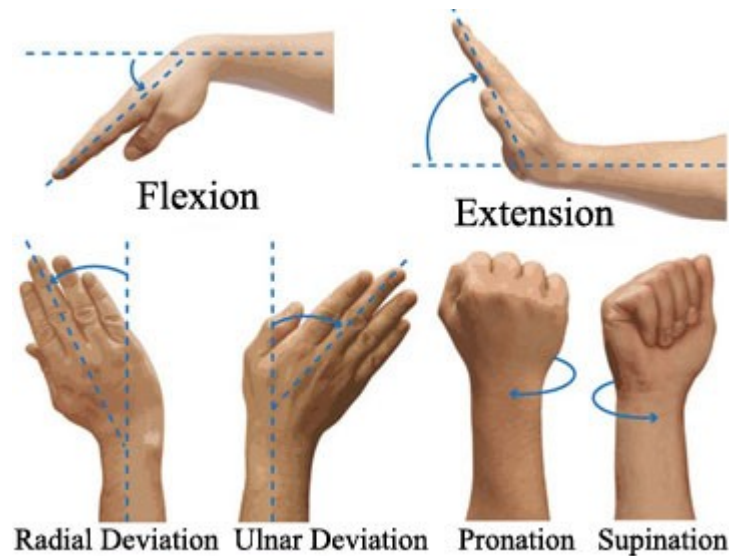
Flexe – 80° až 90°

Extenze – do 70°

Radiální deviace – 15° až 20°

Ulnární deviace – 45°

Pronace a supinace – 150° (při znehybněném lokti)



Obr. 6 Rozsahy pohybu [9]

## 1.3 Spasticita a její léčba

### 1.3.1 Definice

Spasticita je stav, při kterém dochází ke zvýšenému napětí ve svaích. Toto napětí pociťuje pacient při pasivním natahování svalu jako odpor vůči pohybu, zvyšující se při s rychlosti protahovaného svalu.

Příčinami vzniku spasticity jsou poraněná mícha, roztroušená skleróza, cévní mozková příhoda, poranění mozku i dětská mozková obrna.

Léčba spasticity probíhá pomocí léku způsobujících uvolnění svalů, ale hlavně pomocí rehabilitace. [10]

K hodnocení míry spasticity se používá Ashworthova škála. Funguje na principu pasivního protažení spastického svalu v průběhu jedné sekundy. Hodnotí se vždy první provedení testu. [11]

Ashworthova škála hodnocení svalového hypertonu	
<b>0</b>	Žádný vzestup svalového tonu.
<b>1</b>	Lehký vzestup svalového tonu, klade zvýšený odpor (catch) při flexi i extenzi.
<b>2</b>	Výraznější vzestup svalového tonu, avšak končetinu lze snadno flektovat.
<b>3</b>	Podstatný vzestup svalového ton – pasivní pohyb je obtížný
<b>4</b>	Končetiny jsou ztuhlé do flexe i extenze

Tabulka 1 Ashworthova škála [12]

pozn. Catch – Náhlé zvýšení odporu (záškub)



Obr. 7 Příklad spasticity [13]

### 1.3.2 Terapeutická léčba

- Protahování spastických svalů
- Polohování
- Pomocí ortéz
- Stimulování chladem
- Stimulování dlouhodobým působením tepla
- Opakovaným dotykem
- Elektrostimulace
- Masáž
- Akupunktura [14]



## 1.4 Analýza současných systémů

### 1.4.1 DAHO

Ortéza DAHO umožňuje dynamickou korekci kloubu a nápravu nepřirozeného zakřivení ruky, napřímení čtyř prstů v dorso-radiálním směru, fixaci zápěstí v dorso-ulnárním postavení a obnovuje anatomické klenby zápěstí



Obr. 8 DAHO ortéza [15]

### 1.4.2 Saebo

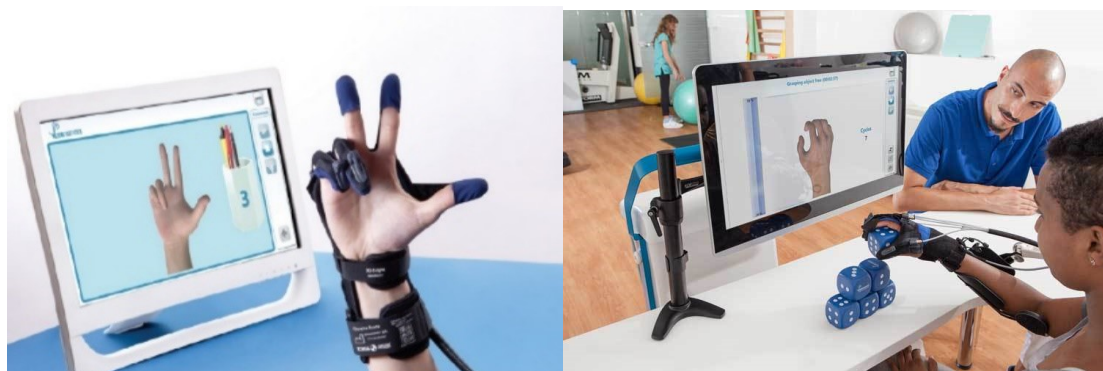
Saebo Glove umožňuje pacientům terapii v domácím prostředí. Funguje na principu napínacího systému otevírající pacientovi ruku.



Obr. 9 Saebo ortéza [16]

### 1.4.3 Gloreha Workstation

Gloreha Workstation podporuje obnovu kloubní a funkční hybnosti ruky. Je navržena na neuromotorickou rehabilitaci horní končetiny



Obr. 10 Gloreha workstation [17]

### 1.4.4 Rapael

Rapael je určen pro aktivní rehabilitaci prstů, zápěstí i předloktí s rozvojem kognitivních funkcí a neuroplasticity.



Obr. 11 Rapael [18]

## 2 Požadavkový list

1. Konstrukce musí být vyrobená v konvenční velikosti s možností mírného přizpůsobení velikosti a tvaru ruky.
2. Exoskeleton musí minimálně omezovat hmatové funkce ruky.
3. Konstrukce exoskeletonu musí být dostatečně komfortní pro 30minutové cvičení.

Požadavkový list řešení	
Řešitel	Bc. Radim Strejček
Uživatel	Anonymní pacient
Exoskeleton pro rehabilitaci horní končetiny	
Hlavní činnost	Exoskeleton slouží k dynamickému rozcvičování horní končetiny v oblasti zápěstí (WHO)
Servisní úlohy, určení	Dynamická ortéza
Operační a pracovní prostředí	Použití především v domácích podmínkách, rehabilitačních střediscích.
Technický scénář	Pacient postižen spasticitou, si oblékne exoskeleton a začne jej kombinací různých pohybů rozhýbávat
Hlavní funkce	Rehabilitace zápěstí
Vedlejší funkce	Rehabilitace prstů (flexe,extenze)
Technické parametry	
Váha	max. 500g
Rychlost	1 rad/sec
Zatížení	Určeno pro 1.stupeň Ashworthovy škály
Cena	5000Kč
Rozsah flexe a extenze zápěstí	45°
Rozsah ulnární a radiální deviace	15°
Rozsah v kořeni prstu	60°

Tabulka 2 Požadavkový list

### 3 Návrh řešení

#### 3.1 Konstrukce kloubu zápěstí

Konstrukce kloubu zápěstí musí umožňovat dva stupně volnosti a ideálně jejich kombinací docílit krouživého pohybu.

Konstrukce zápěstního kloubu je náročná především na rozsah pohybu, který musí být omezen co nejméně a také na sousost kloubu s kloubem operátora, aby nedošlo k jeho poranění. Nejlepší způsob pro objevení optimální varianty byl zvolen způsob výroby prototypu pomocí 3D tisku a praktickém vyzkoušení na lidském kloubu.

##### 3.1.1 Kulový kloub

Kulový kloub se jeví jako ideální řešení díky 3 stupňům volnosti, kterými disponuje, ale jeho rozsah pohybu je omezen svou konstrukcí a velikostí lidské ruky. Také zajišťuje potřebnou sousost s kloubem lidského operátora.



Obr. 12 Kulový kloub

Označení	Kritérium	Hodnota	Významnost	Vážený index
K1	Hmotnost	1	1,4	1,4
K2	Cena	1	1,2	1,2
K3	Složitost	2	1	2
K4	Rozsah	3	1,8	5,4
K5	Pevnost	4	1,6	6,4
Výsledek	<b>16,4</b>			

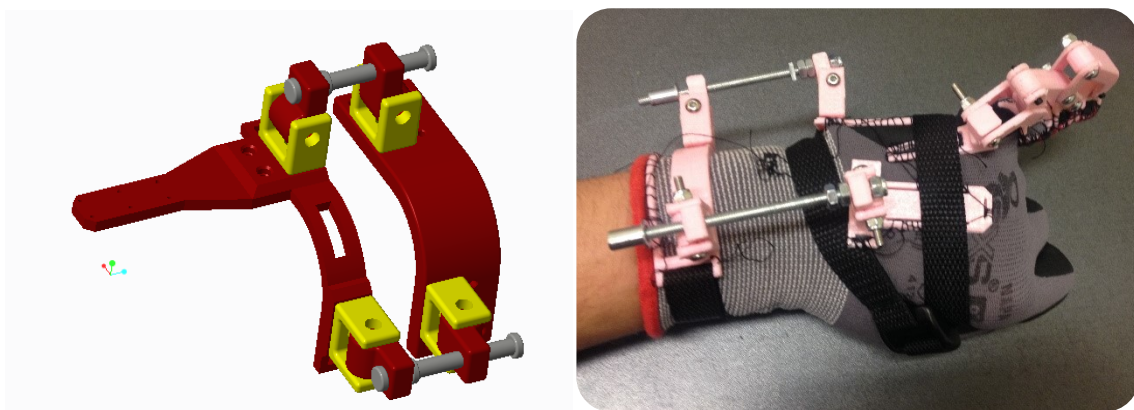
Tabulka 3 Kriteriační analýza kulového kloubu



### 3.1.2 Dva lineární pohony

Druhá možnost pro zajištění dvou stupňů volnosti v zápěstí je kombinace dvou lineárních pohonů. Tato konstrukce byla opět vyrobena a odzkoušena na lidském operátoru, ale vykazovala obrovské nedostatky v pevnosti s jakou vedla operátorovu ruku a také svou celkovou robustností vykazovala velké nedostatky.

Velikým nedostatkem bylo množství pohyblivých dílů, které díky prototypové výrobě pomocí 3D tisku nebyly vhodné a musely by být mnohem více dimenzovány.



Obr. 13 Dva lineární pohony

Označení	Kritérium	Hodnota	Významnost	Vážený index
K1	Hmotnost	3	1,4	4,2
K2	Cena	3	1,2	3,6
K3	Složitost	2	1	2
K4	Rozsah	2	1,8	3,6
K5	Pevnost	1	1,6	1,6
Výsledek				<b>15</b>

Tabulka 4 Kriteriační analýza dvou lineárních pohonů

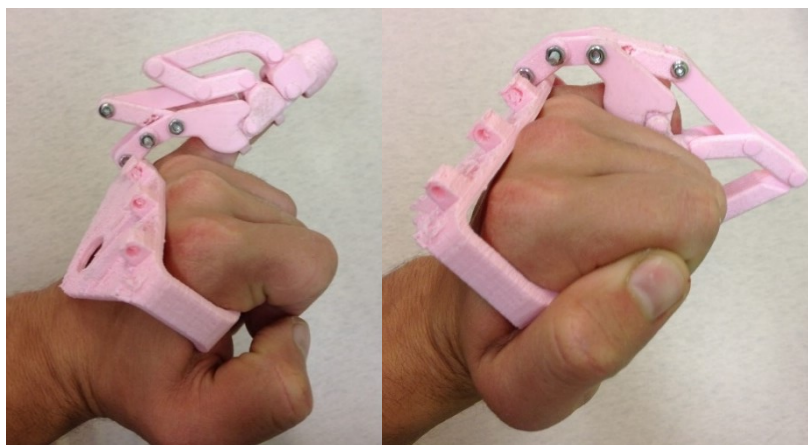
### 3.2 Konstrukce a pohon prstu

U konstrukce prstu je potřeba vyvinout moment ve všech kloubech prstu, kde je velmi omezený prostor. Ideální místo pro umístění mechanismu zajišťující ohnutí na na hřbetě prstu kde nehrozí omezení pohybu.

Klouby prstu mají jeden stupeň volnosti kromě prvního kloubu v kořeni prstu kde jsou dva stupně volnosti. Tento druhý stupeň volnosti je umístěn v místě, kde je velmi málo prostoru a po porovnání složitosti konstrukce a jeho významnosti bylo od něj upuštěno.

#### 3.2.1 S pevnými rameny

Konstrukce s pevnými rameny je dobrá pro přenos tlačné i tažné síly na klouby prstu a jevila se jako optimální. Pro praktické vyzkoušení byla opět vyrobena a odzkoušena na lidském operátorovi a ukázala obrovské nedostatky ve složitosti mechanismu a celkové robustnosti.



Obr. 14 Konstrukce prstu s pevnými rameny

Označení	Kritérium	Hodnota	Významnost	Vážený index
K1	Hmotnost	1	1,4	1,4
K2	Cena	1	1,2	1,2
K3	Složitost	2	1	2
K4	Rozsah	3	1,8	5,4
K5	Pevnost	4	1,6	6,4
Výsledek				16,4

Tabulka 5 Analýza prstu s pevnými rameny

### 3.2.2 S lanovým táhlem

Konstrukce s lanovým táhlem má obrovskou výhodu v jednoduchosti své konstrukce, kdy je potřeba zajistit vedení pro lanko a jeho pevné ukotvení v posledním článku prstu.

Své velké nedostatky má v přenosu tlačné síly, kdy hrozí vytlačování lanka mimo potřebný směr, čímž se snižuje jeho síla. Tato nevýhoda se dá velice jednoduše minimalizovat pomocí vhodné konstrukce jednotlivých článků a použitím lanka s dostatečnou tuhostí. Naopak tažná síla je přenášena s velkým účinkem.



Obr. 15 Konstrukce prstu s lanovým táhlem

Označení	Kritérium	Hodnota	Významnost	Vážený index
K1	Hmotnost	4	1,4	5,6
K2	Cena	3	1,2	3,6
K3	Složitost	3	1	3
K4	Rozsah	2	1,8	3,6
K5	Pevnost	1	1,6	1,6
Výsledek				<b>17,4</b>

Tabulka 6 Analýza prstu s lanovým táhlem

### 3.3 Volba pohonu

U volby pohonu byl kladen obrovský důraz kladen na jeho dobré řízení. Při prvním uvažování nad volbou pohonu byl kladen důraz také na variabilitu jeho umístění a velikost jeho konstrukce z důvodu možného umístění přímo na paži operátora od čehož bylo později upuštěno.

#### 3.3.1 Elektrický

Označení	Kritérium	Hodnota	Významnost	Vážený index
K1	Hmotnost	1	1,4	1,4
K2	Cena	3	1,2	3,6
K3	Složitost	4	1	4
K4	Výkon	3	1,8	5,4
K5	Řízení	5	2	10
K6	Napájení	4	1,6	6,4
Výsledek				<b>24,4</b>

Tabulka 7 Analýza elektrického pohonu

#### 3.3.2 Pneumatický

Označení	Kritérium	Hodnota	Významnost	Vážený index
K1	Hmotnost	3	1,4	4,2
K2	Cena	1	1,2	1,2
K3	Složitost	2	1	2
K4	Výkon	2	1,8	3,6
K5	Řízení	2	2	4
K6	Napájení	1	1,6	1,6
Výsledek				<b>15</b>

Tabulka 8 Analýza pneumatického pohonu



### 3.3.3 SMA wire

Shape memory alloy wire, neboli dráty s tvarovou pamětí jsou velice zajímavou technologickou možností pro nahrazení funkce svalu. Fungují na principu martenzitické transformace, které je dosaženo pomocí změny teploty. Při této změně vykazují obrovský poměr síly na svou hmotnost, většinou v lineárním směru.

Tyto dráty jsou však velice náročné na potřebný mechanismus, který musí transformovat jejich velice malý rozsah na mnohem větší.

Označení	Kritérium	Hodnota	Významnost	Vážený index
K1	Hmotnost	5	1,4	7
K2	Cena	3	1,2	3,6
K3	Složitost	1	1	1
K4	Výkon	5	1,8	9
K5	Řízení	1	2	2
K6	Napájení	4	1,6	6,4
Výsledek				<b>22,6</b>

Tabulka 9 Analýza SMA wire

### 3.4 Optimální varianta

Pro možnost vybrání optimální varianty se jevila široká škála možností různých konstrukcí a bylo tedy postupováno tak, že se rozdělila celá konstrukce exoskeletonu na dílčí celky, které byly jednotlivě zkoumány podle požadavku na daný funkční celek.

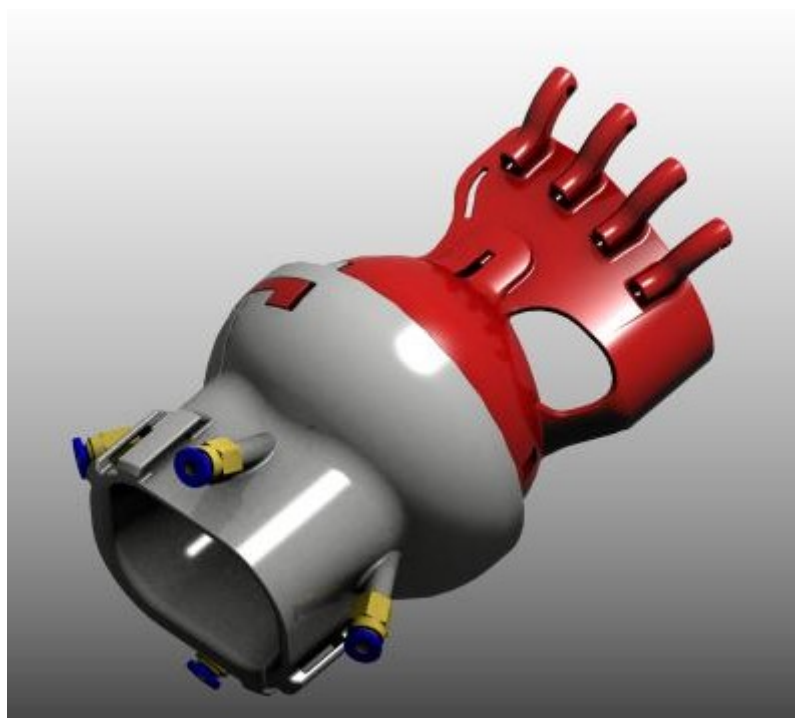
Jako optimální varianta byla vybrána tato kombinace:

- Kulový kloub
- Prsty s lanovým táhlem
- Elektrický pohon

## 4 Konstrukce kloubu zápěstí

Konstrukce kloubu zápěstí, viz. Obr. 16, je inspirována kulovým kloubem, jehož hlavní výhodou je dostatečný počet DOF. Soustředné vedení nám umožňuje potřebné vedení pro zápěstí operátora. Bohužel velkou nevýhodou tohoto řešení je omezující rozsah pohybu, zapříčiněný velikostí vnitřní části kloubu, jehož kulovitá část musí přesahovat přes středovou rovinu, kvůli udržení vedení. Toto řešení nám zároveň omezuje rozsah pohybu při flexi a extenzi o velikost přesahu.

Tento problém je vyřešen jen minimálním přesahem, který však zvyšuje riziko odsazení a následnou nesoustřednost kloubu.



Obr. 16 Kloub zápěstí

Pohyb kloubu je zajištěn dvěma ocelovými lanky kdy jedno je vždy tažné a druhé tlačné, hlavní je však vždy tažné. Na Obr. 17 je lanko znázorněno zelenou barvou.

Flexe zápěstí

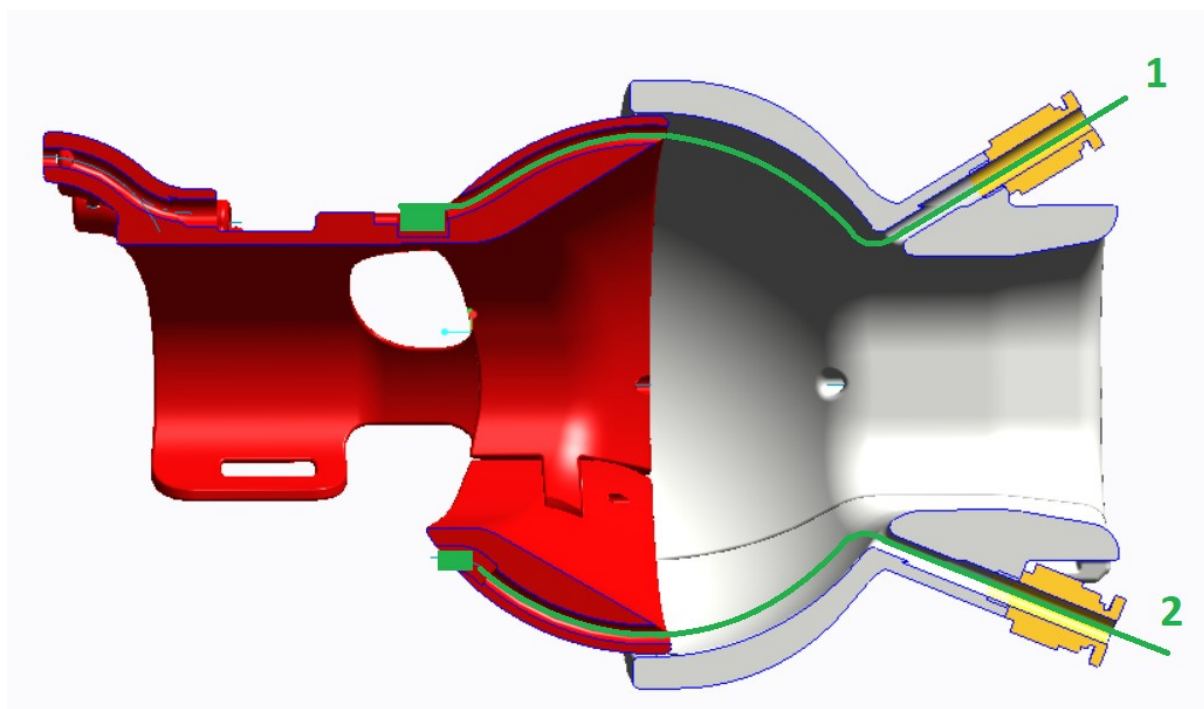
- 1. Tlačné
- 2. Tažné

Extenze

- 1. Tažné
- 2. Tlačné

Můžeme zde také pozorovat nástrčnou spojku s jednostranným šroubením zobrazený žlutou barvou. Šroubení umožňuje rychlé uchycení vedení pro lanko od zápěstí k pohonu, tzv. bowden. Díky tomuto řešení je možné přenášet mechanickou sílu od pohonu, což dovoluje samotný pohon umístit mimo zápěstí operátora a tím minimalizovat hmotnost exoskeletonu a tím zvýšit komfort operátora.

Na obrázku je vidět velikost přesahu za středovou rovinu, díky které je udrženo vedení v druhé části kloubu.



Obr. 17 Řez kloubem zápěstí

Vzhledem k volbě pevného kloubu bylo nutné vymyslet systém umožňující oblékání exoskeletonu, který musí zajišťovat dostatečnou pevnost konstrukce a zároveň být velice jednoduchý. To je zajištěno tvarovým zámekem, zajištěným magnetickým páskem umístěným na zámku a západce. Při otevírání kloubu musí být také zajištěno povolení lanka. Toto je vyřešeno pomocí mechanismu na převodovém ústrojí, který je popsán dále.

Hřbetová část kloubu je vedena od zápěstí až ke kořeni prstů, viz Obr. 18. Zde jsou umístěny otvory pro popruh, kterým se přitáhne konstrukce k ruce. Tato část je také uchycena pomocí lepidla určeného na plasty k rukavici, čímž je zajištěn přenos momentu, který je rozložen po celé ploše hřbetu ruky operátora,. Díky použití rukavice je splněn požadavek na dostatečnou citlivost dlaně a prstů.

Tato hřbetová část byla na počátku vyvíjena odděleně od uchycení pro prsty, aby byla umožněna jejich volnost a zároveň bylo dosaženo maximální přizpůsobení se exoskeletonu na ruku operátora. Tato možnost však byla po výrobě prototypu zavržena z důvodu nízké pevnosti konstrukce v kořeni prstu, což vedlo k náhodným pohybům prstů a to by mohlo být velice nebezpečné pro operátora.

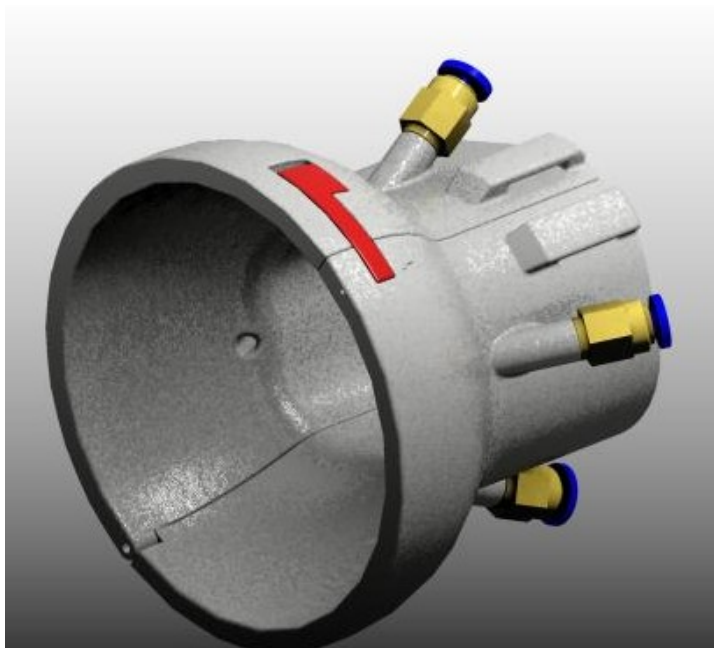
Po této zkušenosti musel být vymodelován tvar, který by dostatečně pasoval k ruce, ale měl zároveň dostatečnou vůli pro odlišný tvar ruky jiného operátora. Toho bylo také dosaženo výrobou mnoha testovacích vzorků.



Obr. 18 Hřbetová část kloubu



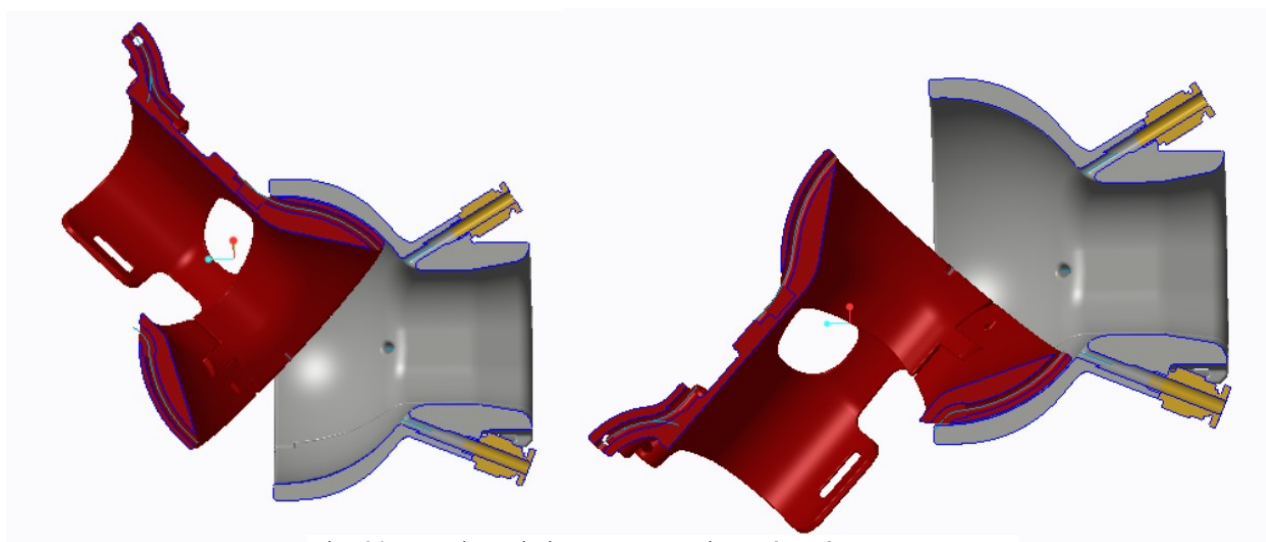
Druhou část kloubu vidíme na Obr.19 . Zamykací mechanismus je řešen stejným způsobem, jako v první části. V části za zápěstím je exoskeleton opět utažen pomocí popruhu umožňující rychle utažení a povolení.



Obr. 19 Druhá část kloubu

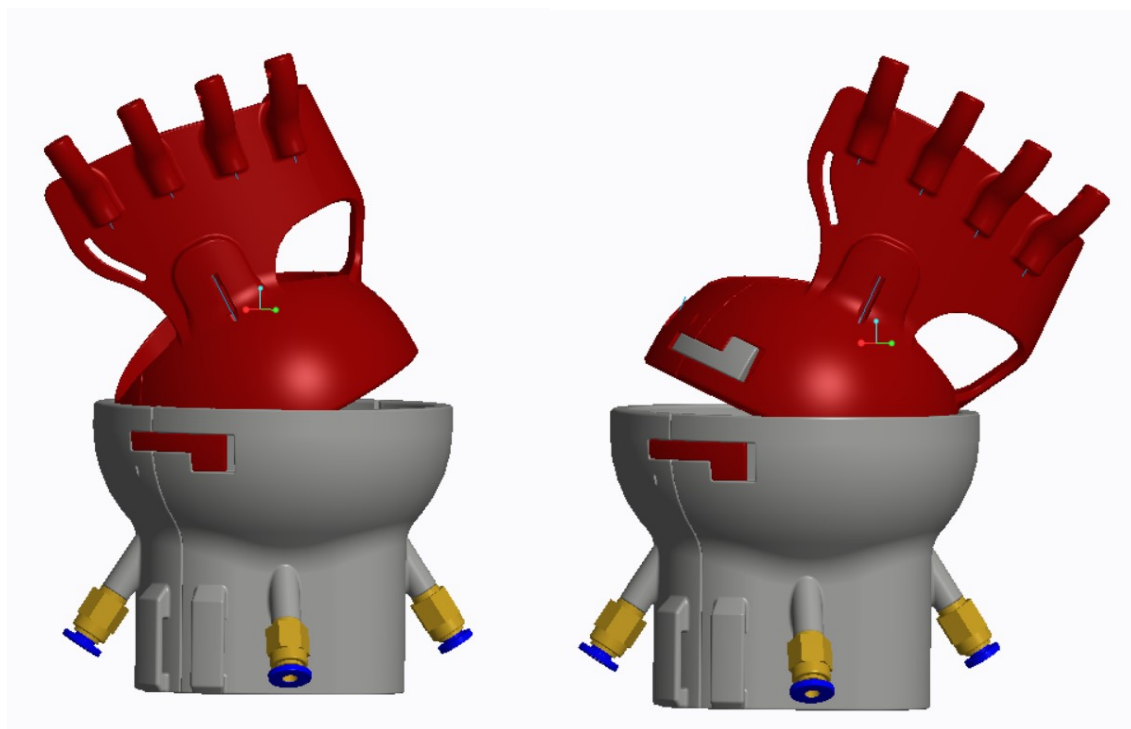
#### 4.1 Rozsahy pohybu v zápěstí

Na Obr.20 je znázorněn rozsah pohybu Extenze a Flexe v zápěstí o velikost  $45^\circ$ . Je zde také vidět popisované omezení pohybu díky konstrukci kulového kloubu.



Obr. 20 Rozsahy pohybu Extenze a Flexe zápěstí

Na Obr. 21 jsou ukázány rozsahy pohybu radiální a ulnární deviace o velikosti  $15^\circ$ . Zde není takové omezení z důvodu konstrukce kulového kloubu, ale hlavně z důvodu konstrukce pro ruku.



Obr. 21 Rozsah pohybu radiální a ulnární deviace

## 4.2 Návrh pohonu pro pohyb zápěstí

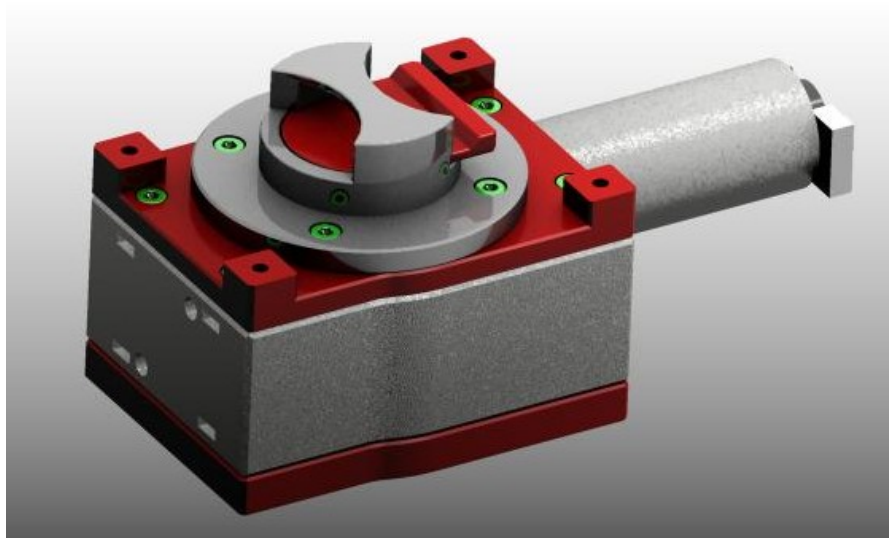
Výpočet pohonu pro zápěstí		
Zadané hodnoty	Výpočet	Číslo
Síla v zápěstí		
Mkw := 3 N·m rw := 39.5mm	$F := \frac{Mkw}{rw} = 75.949N$	1
Výpočet pohonu		
rg := 25mm i := 20 $n := 80 \cdot \frac{1}{\text{min}}$	Mkg := F · rg = 1.899N·m	2
	$Mkm := \frac{Mkg}{i} = 94.937N \cdot mm$	3
	P := Mkm · 2 · π · n = 0.795W	4
	$ng := \frac{n}{i} = 4 \frac{1}{\text{min}}$	5
Motor		
n := 80 · $\frac{1}{\text{min}}$		
Pm := 1.7W		
Mkm = 100 N·mm		
im := 75		
Výpočet parametrů převodového ústrojí		
Palmární flexe/Extense		
α := 45° α = 0.785rad ωdov := 1 $\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$	s1 := α · rw = 31.023mm	6
	ω := 2 · π · ng = 0.419 $\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$	7
	ωdov > ω	
	v := ω · rg = 10.472 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	8
	t1 := $\frac{s1}{v} = 2.962s$	9
	αg := $\frac{s1}{rg} = 1.241\text{rad}$	10
	αg = 71.1°	
	n1 := $\frac{\alpha g}{2\pi} = 0.197$	11
	nm1 := n1 · i · im = 296.25	12

Radiální dukce / Ulnární dukce		
$\beta := 15^\circ$	$s2 := \beta \cdot rw = 10.341 \text{ mm}$	13
$\omega_{dov} := 1 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$	$\omega := 2 \cdot \pi \cdot ng = 0.419 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$	14
	$\omega_{dov} > \omega$	
	$v := \omega \cdot rg = 10.472 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	15
	$t2 := \frac{s2}{v} = 0.987 \text{ s}$	16
	$\beta_g := \frac{s2}{rg} = 0.414 \text{ rad}$	17
	$\beta_g = 23.7^\circ$	
	$n2 := \frac{\beta_g}{2\pi} = 0.066$	18
	$nm2 := n2 \cdot i \cdot im = 98.75$	19

Tabulka 10 Výpočet pohonu pro zápěstí

### 4.3 Konstrukce převodového ústrojí pro zápěstí

Převodové ústrojí, viz. Obr.22, pracuje na principu navíjecí cívky poháněné šnekovým převodem. V mechanismu je také zapracován systém pro uvolnění jedné cívky ze záběru, což umožňuje povolení lanka pro možnost oblečení exoskeletonu na operátora.



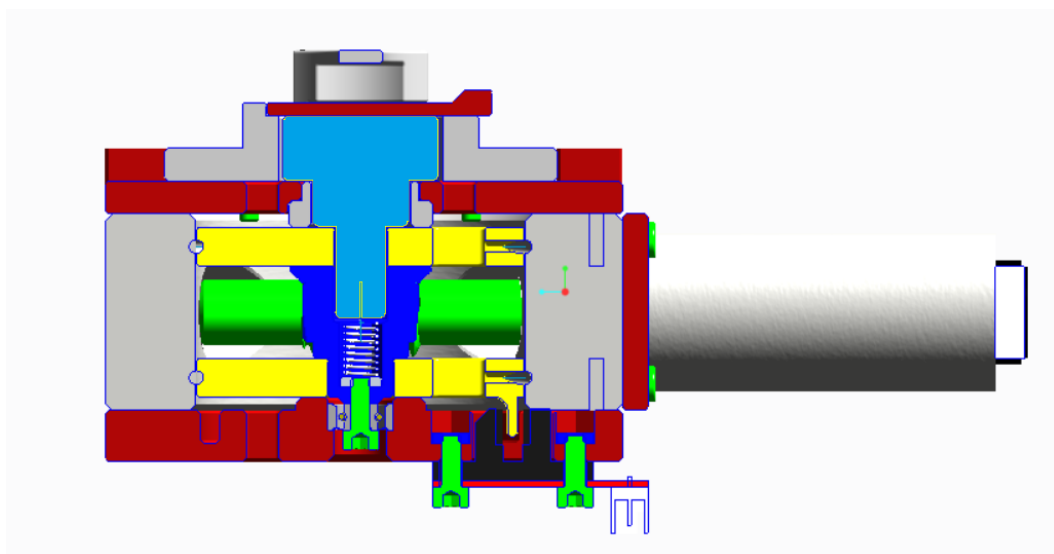
Obr. 22 Převodové ústrojí pro zápěstí

Na Obr.23 je vidět řez převodovým ústrojím, kde žluté disky jsou navíjecí cívky pro lanko. Spodní disk je navržen tak aby byl vždy pevně v záběru s ozubeným kolem.

Horní disk je s ozubeným kolem spojen přes hřídel znázorněnou světle modrou barvou. Tato hřídel je zajištěna západkou, která po vysunutí umožní vysunutí hřídele a následné odpojení horního disku od ozubeného kola. Poté může s hřídelí operátor pootočit a dle potřeby si uvolnit jedno lanko.

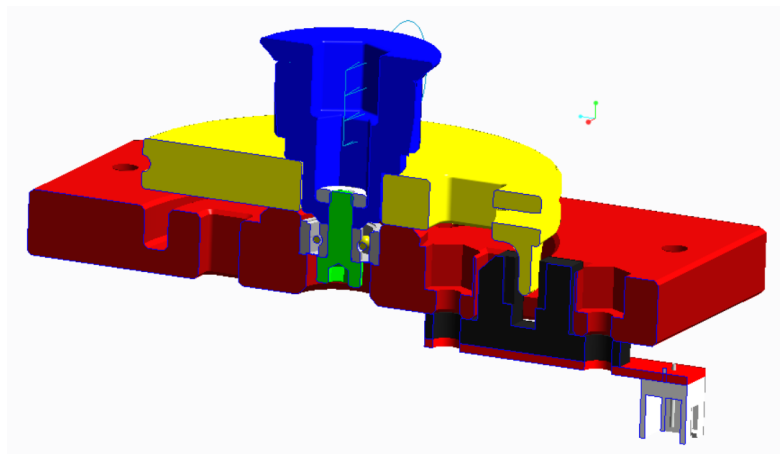
Z nedostatku prostoru zde není vyřešen mechanismus, zajišťující vracení disku do původní polohy. Je tedy nutné označení místa kde je disk ve výchozí poloze a po uvolnění jej opět vrátit do původní polohy.

Šnekový převod byl upraven podle výchozího modelu [32],[33].



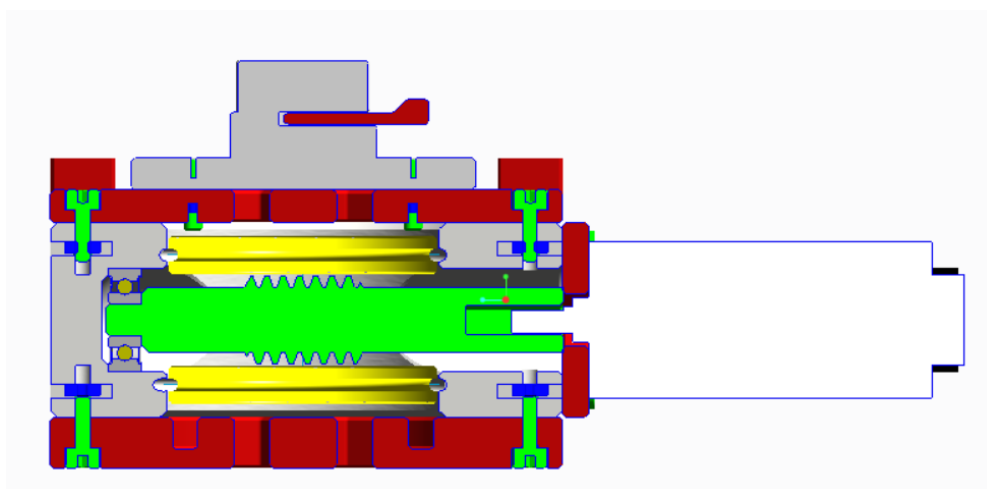
Obr. 23 Řez převodovým ústrojím

Na Obr. 24 je vidět detailní pohled na pevně spojený disk s ozubeným kolem. Na spodní straně disku je výstupek umožňující rozpoznání výchozí polohy pro disk pomocí optického senzoru. Toto místo je velice důležité kvůli nastavení celého mechanismu. V tomto místě je exoskeleton v přímé poloze a víme kolik otáček motoru je potřeba pro maximální rozsah pohybu.



Obr. 24 Detailní pohled převodového ústrojí

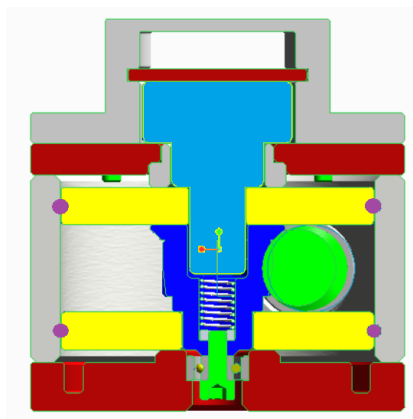
Na Obr. 25 je zobrazen řez v ose motoru. V prvních verzích převodového ústrojí byl šnek bez zapření v ložisku, což vzhledem k materiálu ze kterého byl vyráběn prototyp (PET – 3D Tisk), způsobovalo přeskakování zubů a jejich následném poškození.



Obr. 25 Řez v ose motoru

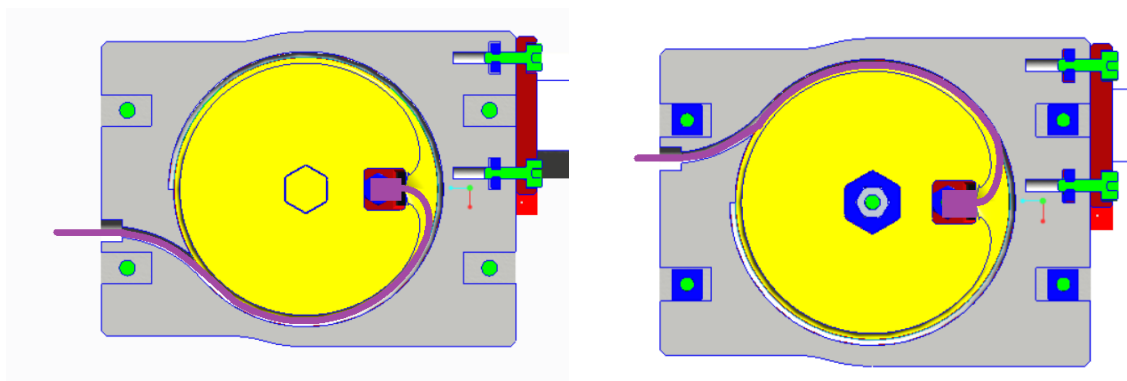


Na Obr.26 je znázorněn řez kolmo k ose motoru. Fialovou barvou je zde znázorněna cesta pro lanko, které je navíjeno na žluté disky.



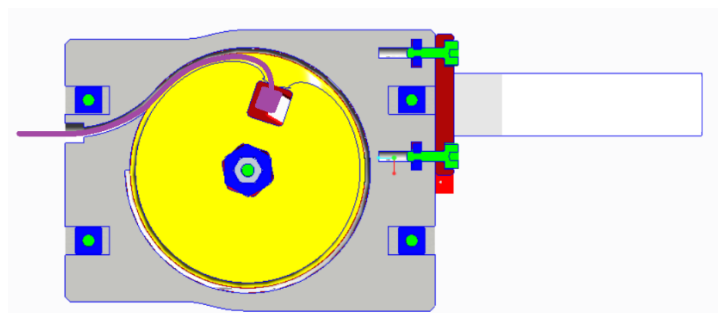
Obr. 26 Řez kolmo k ose motoru

Na Obr.27 je vidět řez středem disku znázorňující cestu prvního i druhého lanka. Cesta je opačná z důvodu, aby bylo zajištěno tažení jedním a tlačení druhým lankem a opačně.



Obr. 27 Řez ve středech horního a dolního disku

Maximální natočení disku je v této konstrukci velice důležité, jelikož po překročení kritického natočení blízko k výstupu lanka, dochází k prudkému nasunutí a následném zaseknutí celého mechanismu. Na Obr.28 je vidět maximální potřebný úhel natočení disku vypočtený výše (10). Tato vzdálenost je dostatečně daleko od kritického místa.



Obr. 28 Maximální potřebný úhel natočení disku

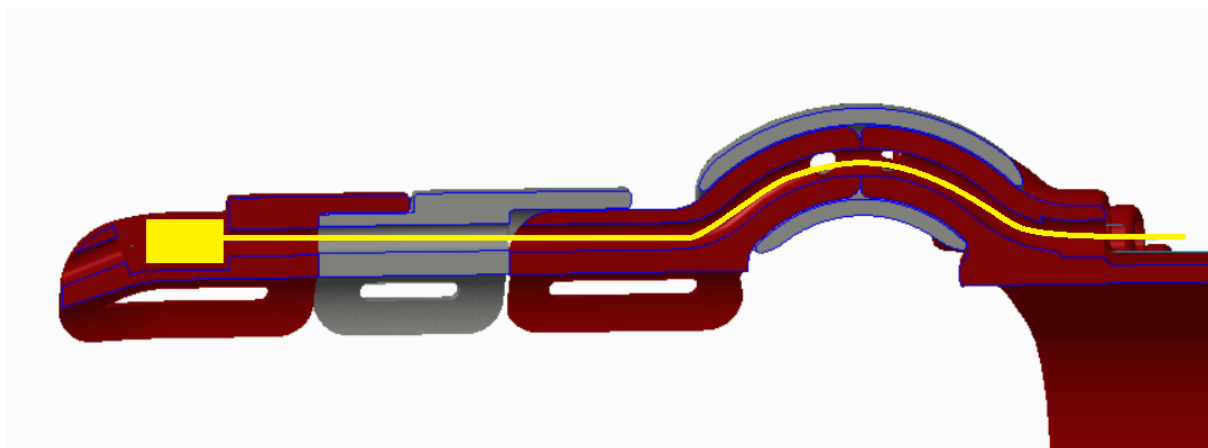
## 5 Konstrukce prstů

Mechanismus zajišťující pohyb prstu je zde řešen pomocí lanového táhla, které zde slouží také jako tlačné táhlo. Lanové táhlo není ideální pro přenášení tlačné síly a tak zde museli být aplikovány prvky minimalizující tyto nedostatky. Z experimentu bylo vybráno lanko o průměru 1,25mm, které je dostatečně tuhé aby se příliš neohýbalo a tím nezpůsobovalo kroucení mimo určenou trasu při ohybu mezi jednotlivými články prstu. Při použití lanka s průměrem 1,5mm již bylo lanko příliš tuhé a zvyšovalo odpor při ohybu.

Na Obr.29 je znázorněno žlutou barvou lanko, vedoucí po hřbetové části prstu. Lanko je v posledním článku ukotvené pomocí spojky na ocelové lanka. V této konstrukci není možné ohýbat zvlášť jednotlivé články prstu, což ale pro účel rehabilitace není potřeba.

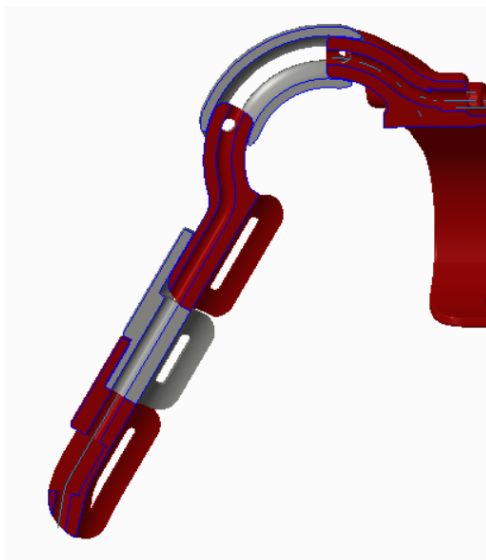
Mechanismus je navržen tak, aby ohýbal článek který vykazuje vždy nejmenší odpor, který vzrůstá s velikostí ohybu. Pro pacienty postižené spasticitou je však mnohem důležitější narovnáni prstů, pro které je již lanové táhlo vhodné.

Na jednotlivých člancích prstu můžeme pozorovat doraz, sloužící jednak jako vedení pro správné uložení prstu při natažení a zároveň jako mechanická zábrana proti případnému vybočení lanka.



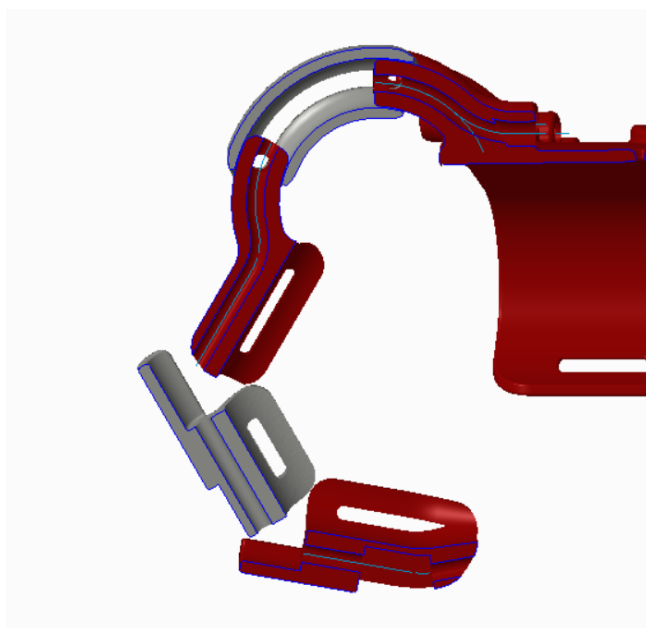
Obr. 29 Řez v konstrukci prstu

Na Obr.30 je znázorněn maximální úhel ohnutí v kořeni prstu, který je jako jediný řešení mechanickým dorazem. V tomto místě je velice komplikované navrhnout ideální uchycení prstové konstrukce ke hřbetu ruky. Prst operátora má v tomto místě 2DOF, což pro účel rehabilitace by bylo ideální zajistit, ale vzhledem ke složitosti od toho bylo upuštěno. Exoskeleton v tomto místě zajišťuje pouze 1DOF v rozsahu  $60^\circ$ .



Obr. 30 Rozsah pohybu v kořeni prstu

Na Obr.31 je vidět maximální ohyb prstu, který je však teoretický. Vychází z rovnoměrně rozložené délky natažení lanka mezi jednotlivé články. Mezi posledními třemi články je počítáno s úhlem ohybu  $30^\circ$



Obr. 31 Rozsah pohybu celého prstu

Na Obr.31 můžeme také pozorovat, že jednotlivé články prstu nejsou vzájemně nijak spojeny a pokrývají jen hřbetovou část prstu. Toto řešení bylo potřeba pro zajištění citlivosti pro pacienta. Vzájemné propojení jednotlivých článků zajišťuje rukavice, na kterou jsou všechny články přilepeny. Řešení pomocí rukavice má velikou výhodu v relativně dobrém přizpůsobení se ruce pacienta, ale opět bylo potřeba najít vhodnou rukavici, která měla dostatečnou pevnost pro uchycení exoskeletonu a zároveň poskytovala dobrou citlivost.

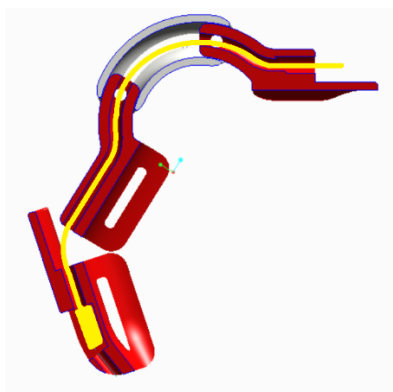
Konstrukce pro jednotlivé prsty jsou tvarově stejné a liší se jen v délce jednotlivých článků. Toto je z důvodu jednoduchosti optimalizace pro různé konvenční velikosti ruky, kdy se změní jen měřítko dílů. Tento prototyp je rozměrově navržen pro velikost ruky 9 (L).

Jediným rozdílem je konstrukce pro palec, která má o jeden (středový) článek méně. Jeho uchycení je taktéž jiné. Konstrukce pro palec je uchycena samostatně k rukavici, mimo konstrukci zápěstí. Toto je z důvodu velké možnosti pohybu palce a tato konstrukce v tom nijak nebrání, viz. Obr.32



Obr. 32 Konstrukce palce

Na Obr.33 je vedení lanka konstrukcí pro palec a jeho maximální ohyb dopočítaný (40) kvůli rozdílu délky vysunutí vycházející z chybějícího středového článku.



Obr. 33 Řez konstrukcí palce

## 5.1 Návrh pohonu pro pohyb prstů

Výpočet pohonu pro prsty		
Zadané hodnoty	Výpočet	Číslo
Síla v prstech		
$Mk_{1f} := 200 \text{ N} \cdot \text{mm}$ $Lf := 20 \text{ mm}$	$F_{1f} := \frac{Mk_{1f}}{Lf} = 10 \text{ N}$	20
	$F_{5f} := F_{1f} \cdot 5 = \text{ N}$	21
Výpočet šroubu		
$F := F_{5f}$	$S := \frac{F}{\sigma D d} = 0.5 \cdot \text{mm}^2$	23
	$d3 := \sqrt{4 \cdot \frac{S}{\pi}} = 0.798 \cdot \text{mm}$  Volím šroub TR 8x8	24
Výpočet pohonu		
$d := 8 \text{ mm}$ $d2 := 7 \text{ mm}$ $P := 8 \text{ mm}$ $f := 0.10 \text{ €}$ $\beta := 15^\circ$	$\gamma := \text{atan}\left(\frac{P}{\pi \cdot d2}\right) = 19.991^\circ$	25
	$\phi := \text{atan}\left(\frac{f}{\cos(\beta)}\right) = 6.263^\circ$	26
	$Fo := F \cdot \tan(\gamma + \phi) = 24.661 \text{ N}$	27
	$Mk := Fo \cdot \frac{d2}{2} = 86.312 \text{ N} \cdot \text{mm}$	28
	$Pm := 2 \cdot \pi \cdot Mk \cdot n = 0.723 \cdot W$	29
Motor		
$n := 80 \cdot \frac{1}{\text{min}}$ $Pm := 1.7 \text{ W}$ $Mkm = 100 \text{ N} \cdot \text{mm}$ $im := 75$		
Výpočet parametru převodovky		
$r1 := 12 \text{ mm}$ $\alpha := 30^\circ$ $\alpha = 0.524 \text{ rad}$ $\omega_{dov} := 1 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$	$v := P \cdot n = 10.667 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	30
	$s1 := \alpha \cdot r1 = 6.283 \text{ mm}$	31
	$t1 := \frac{s1}{v} = 0.589 \text{ s}$	32
	$\omega1 := \frac{\alpha}{t1} = 0.889 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ $\omega_{dov} > \omega1$	33

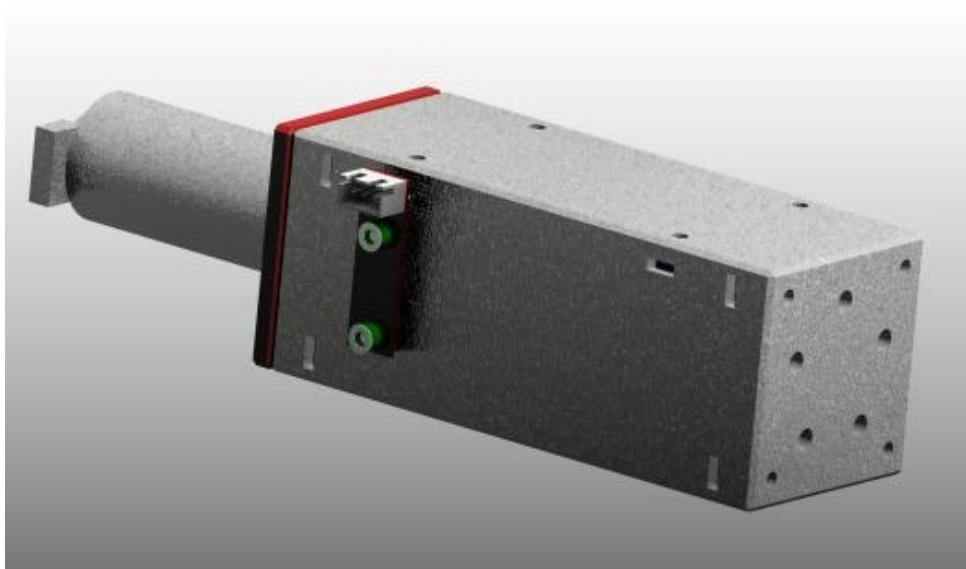
$r_2 := 20\text{mm}$ $\beta := 60^\circ$ $\beta = 1.047\text{rad}$        $r_3 := 13.5\text{mm}$          $im := 75$	$s_2 := \beta \cdot r_2 = 20.944\text{mm}$	34
	$t_2 := \frac{s_2}{v} = 1.963\text{s}$	35
	$\omega_2 := \frac{\beta}{t_2} = 0.533 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$	36
	$\omega_{dov} > \omega_2$	
	$s_{\text{xx}} := 2 \cdot s_1 + s_2 = 33.51\text{mm}$	37
	$t := \frac{s}{v} = 3.142\text{s}$	38
	$sp := s - s_2 = 12.566\text{mm}$	39
	$\delta_{\text{xx}} := \frac{sp}{r_3} = 53.333^\circ$	40
	$tp := \frac{sp}{v} = 1.178\text{s}$	41
	$\omega_p := \frac{\beta}{tp} = 0.889 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$	42
	$\omega_{dov} > \omega_p$	
	$nm := im \cdot \frac{s}{p} = 314.159$	43

Tabulka 11 Výpočet pohonu pro prsty



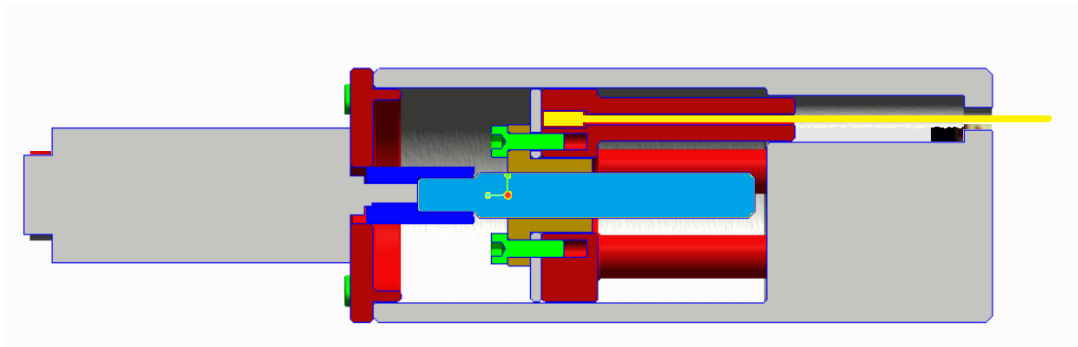
## 5.2 Konstrukce převodového ústrojí pro prsty

Převodové ústrojí pro pohon mechanismu prstů, viz. Obr.34, funguje na principu lineárního posuvu pomocí trapézového šroubu. Při návrhu této převodovky je uvažováno jednotné ovládání pro všechny prsty najednou. Pro rehabilitaci by bylo mnohem vhodnější použít ovládání pro jednotlivé prsty, jako například u Gloreha Workstation, avšak u tohoto řešení by bylo nutné použít více pohonů, což by velice prodražilo a zvětšilo celkovou konstrukci.



Obr. 34 Převodové ústrojí pro prsty

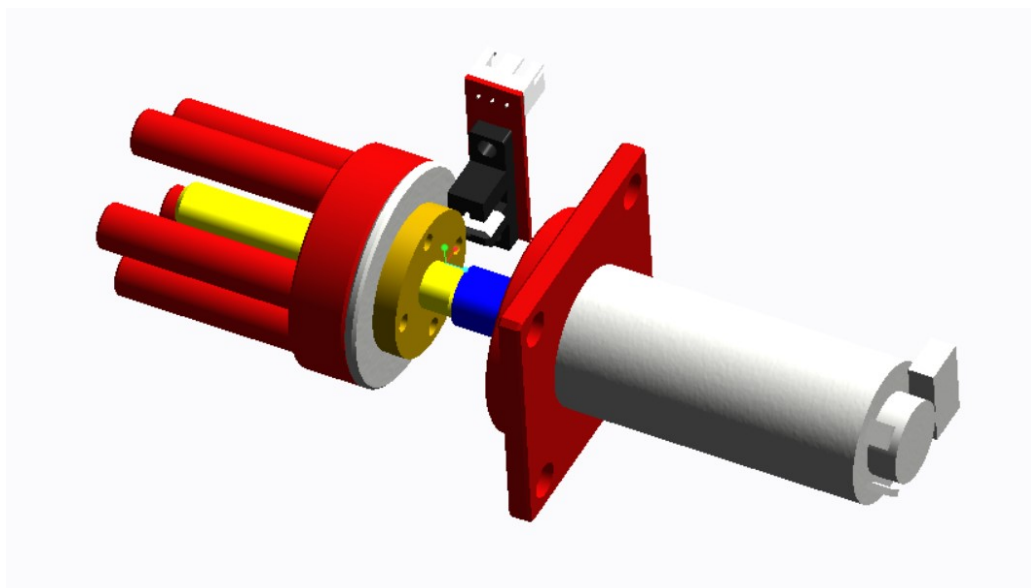
NA Obr.35 je znázorněn řez v ose motoru. Zde je ukázáno lanové táhlo žlutou barvou, které je na konci pístu uchyceno pomocí spojky na ocelové lanka. Rozměry pístu byly pomocí experimentu zmenšovány aby nedocházelo ke kroucení lana v prostoru pro píst.



Obr. 35 Řez převodovým ústrojím pro prsty

Z výpočtu vychází trapézový šroub s průměrem 8 mm se stoupáním 8 mm a čtyřmi chody závitu. Trapézový šroub, zobrazený světle modrou barvou je v celé konstrukci jediný díl, který je nutné mechanicky opracovat na soustruhu aby bylo možné jej umístit na spojku zobrazenou tmavě modrou barvou.

Na Obr.36 je ukázán vnitřní část převodového ústrojí. Zde vidíme matici a trapézový šroub, píst s pěti válci zajišťující vedení pro lanko k jednotlivým prstům. Optický senzor, který detekuje výchozí bod pro zjištění polohy. Přerušením optického signálu pomocí výstupku na přírubě pístu dostaneme informaci o této poloze. Z tohoto budu je vypočten (43) počet otáček na motoru pro zajištění požadovaného posuvu pístu.

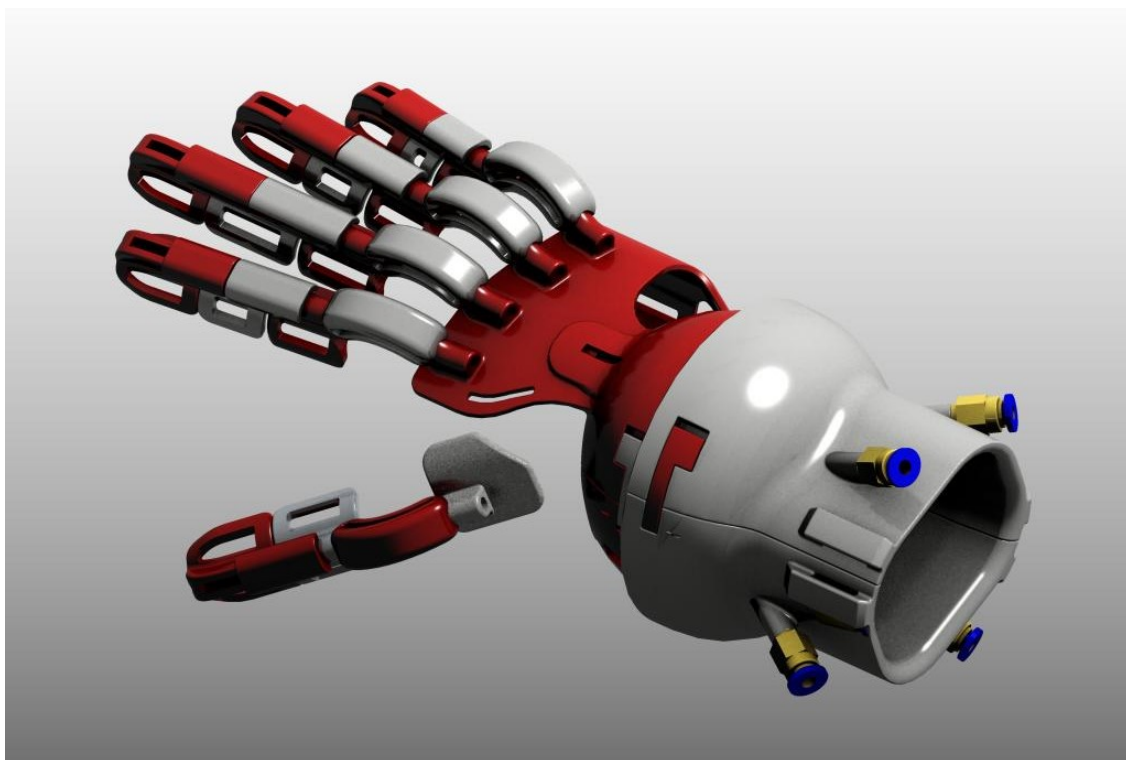


Obr. 36 Vnitřní část převodového ústrojí pro prsty

## 6 Kompletní WHO

Kompletní konstrukce WHO exoskeletonu na Obr.37 . Celkové rozměry jsou navrženy s ohledem na zajištění dostatečného pohodlí pro operátora. Robustnost celé konstrukce je minimalizovaná na funkční minimum, kvůli budoucímu vývoji plně mobilního exoskeletonu pro pacienty s trvale omezenou hybností. Váha této části konstrukce je dopočítaná přes množství spotřebovaného materiálu při 3D tisku a není tedy přesná a může se lišit v řádu jednotek procent při použití jiného typu materiálu a hustoty použité výplně jednotlivých dílů. Váha této konstrukce vychází na 200 g. Zde není započítána hmotnost lanka, teflonové trubičky pro vedení lanka a rychlospojky se šroubením. Vzhledem k požadavku na váhu 500g bylo ale dosaženo veliké rezervy.

Pro budoucí vývoj by bylo vhodné navržení pohonu zvlášť pro jednotlivé prsty s možností druhého stupně volnosti v kořeni prstu a zvětšení rozsahu pohybu v zápěstí. Také by bylo daleko účinnější pro rehabilitaci dopracovat kompletní exoskeleton pro celou horní končetinu, aby efekt rozhybávání pacientu postižených spasticitou měl maximální možný účinek.



Obr. 37 Exoskeleton WHO

## 7 Box

Konstrukce boxu na Obr.38 je navržena pro dvě převodové ústrojí zápěstí, jedno pro prsty a veškerou elektroniku. Ovládání exoskeletonu je umístěno na předním panelu a je zajištěno dvěma Joysticky.

První Joystick zleva zajišťuje pohyb zápěstí. Horizontálním pohybem doleva a doprava pohubujeme radiální a ulnární deviací. Vertikálním pohybem nahoru a dolů je řešená flexe a extenze zápěstí.

Druhý Joystick je určen pro ovládání prstů. U tohoto Joysticku je využit jen vertikální pohyb nahoru a dolů pro flexi a extenzi prstů.

Joysticky jsou vybavený také tlačítkem, které je určeno pro nastavení zápěstí a prstů do výchozí pozice.

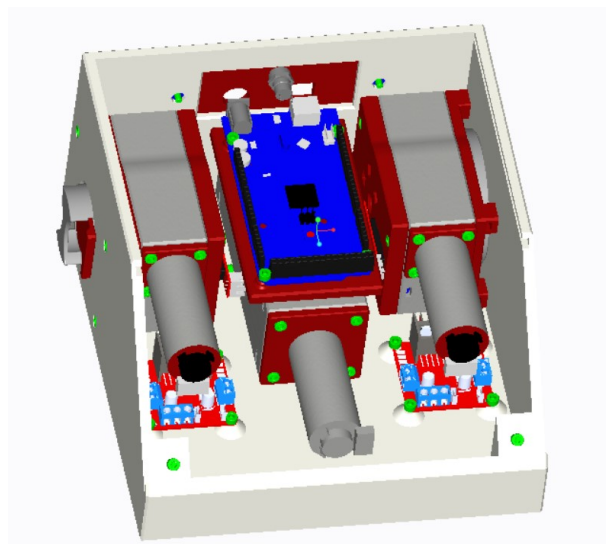
Na pravé straně předního panelu je umístěn kolébkový vypínač pro snadné zapnutí a vypnutí celého systému.

Na obou stranách boxu jsou umístěny převodová ústrojí pro pohyb zápěstím, kvůli nutné dostupnosti k mechanismu zajišťující uvolnění lanek pro snadné oblékání exoskeletonu.



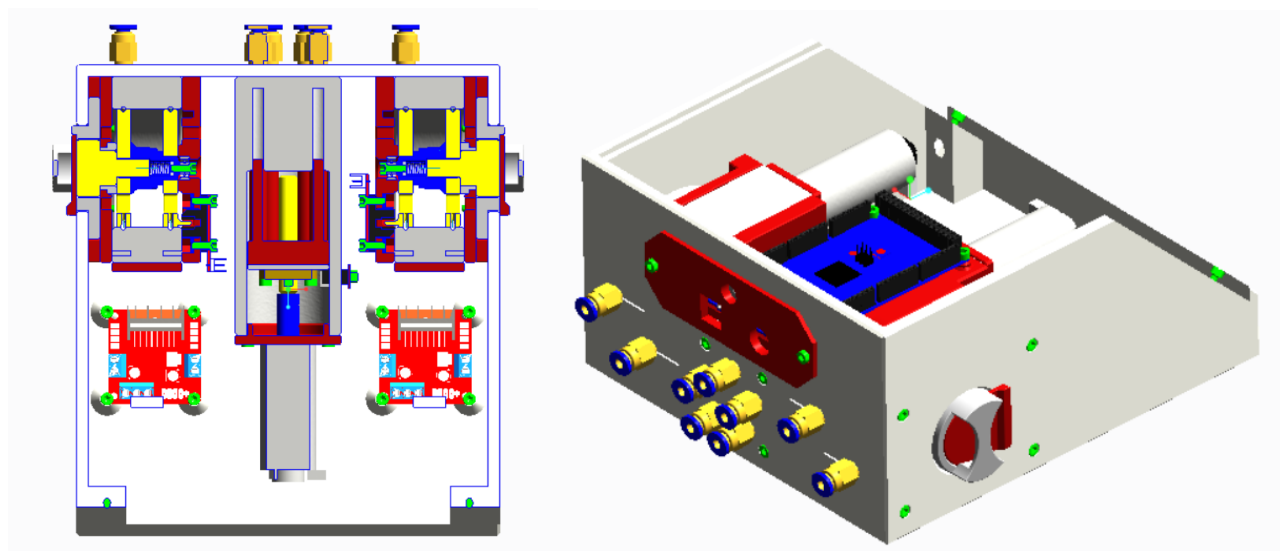
Obr. 38 Box

Vnitřní uspořádání jednotlivých částí je ukázáno na Obr. 39. Zde je vidět sestavení převodových ústrojí, řídicí jednotky Arduino Mega 2560, dvou L298N H můstku pro řízení motorů, a panelu s otvory pro napájení celého systému. Arduino je umístěno na desce a připevněno ve střední části na převodovém ústrojí pro prsty. H můstky jsou umístěny za převodovým ústrojím pro zápěstí. Na jednom H můstku jsou napojeny oba motory pro zápěstí. Na druhém H můstku je zapojen motor pro prsty.



Obr. 39 Vnitřní uspořádání boxu

Detailnější pohled na vnitřní uspořádání nám ukazuje Obr.40, který je proveden v řezu v ose rotace převodového ústrojí pro zápěstí. Zde můžeme také vidět šroubení pro rychlé zapojení teflonové trubičky sloužící jako vedení pro lanko, které je lépe vidět na obrázku v pravo. Na tomto obrázku je také vidět uspořádání vývodu pro napájení.



Obr. 40 Detailnější pohled na box

## 8 Výroba

Celá konstrukce byla od začátku navrhována tak, aby byla celá vyrobitelná pomocí technologie 3D tisku. Výroba dílu probíhala na 3D tiskárně Original Prusa i3 Mk3 s plochou tisku 250 x 210 x 210mm a s tryskou 0,4mm od firmy Prusa Research s.r.o. Nastavení tisku jednotlivých komponent probíhalo v softwaru Prusa Control 0.9.4.\_415\_beta, které je velice jednoduché a uživatelsky přívětivé, ale nedokáže pokročilejší nastavení parametrů. Soupis nastavení jednotlivých dílů je uveden v tabulce.

### 8.1 Nastavení jednotlivých dílů

Díl	Počet ks	Materiál	Kvalita	Výplň	Čas	Množství filamentu
Box_5000_box						
box_5001_box	1	PET	0,2 mm	20%	15h 54min	104,1m
box_5101_front_panel	1	PET	0,2 mm	20%	3h 2min	20,5m
box_5003_top_panel	1	PET	0,2 mm	20%	2h 53min	23m
box_5002_back_panel	1	PET	0,2 mm	20%	26min	3,2m
box_5003_arduino_desk	1	PET	0,2	20%	55min	7m
Celkem 23 h 10 min a 157,8 m						
Převodovka wrist						
gear_2004_gear_01	2	PET	0,1 mm	70%	55min	1,1m
gear_2103_gear_02	2	PET	0,1 mm	70%	2h 30min	2,2m
gear_2001_gearbox_wrist	2	PET	0,2 mm	20%	2h 14min	14,9m
gear_2005_gearbox_shield_01	2	PET	0,2 mm	20%	1h	5,9m
gear_2006_gearbox_shield_02	2	PET	0,2 mm	20%	1h 11min	7,6m
gear_2007_limit_ring	2	PET	0,2 mm	20%	10min	0,4m
gear_2201_lock_flange	2	PET	0,2 mm	20%	52min	4,5m
gear_2202_lock_shaft	2	PET	0,15 mm	70%	54min	2,3m
gear_2002_gearbox_disk_01	2	PET	0,1 mm	20	34min	2,5m
gear_2003_gearbox_disk_02	2	PET	0,1 mm	20%	32min	2,5m
gear_2101_engine_flange	2	PET	0,2 mm	20%	11min	1,1m
gear_2203_key	2	PET	0,15 mm	20%	10min	0,8m
Celkem 22 h 26 min a 91,6 m						



Gear_4000_fingers						
gear_4001_gearbox_fingers	1	PET	0,2 mm	20%	4h 45min	27,6m
gear_4002_gear_piston	1	PET	0,2 mm	20%	1h 30min	5m
gear_4004_engine_flange	1	PET	0,2 mm	20%	30min	2,7m
gear_4003_piston_flange	1	PET	0,2 mm	20%	8min	0,8m
gear_4007_clutch	1	PET	0,15 mm	70%	34min	0,5m
Celkem 7 h 32 min a 37,1 m						
Who_1200_wrist_02_rh						
who_1201_body_01_rh	1	PET	0,15 mm	20%	1h 18min	4,7m
who_1202_body_02_rh	1	PET	0,15 mm	20%	3h 54min	10,3
who_1103_lock_rh	1	PET	0,15 mm	20%	9min	0,2m
Celkem 5 h 21 min a 15,2 m						
Who_1000_wrist_01_rh						
who_1101_body_01_rh	1	PET	0,15 mm	20%	3h 5min	12,1m
who_1102_body_02_rh	1	PET	0,15 mm	20%	3h 5min	12,2m
who_1103_lock_rh	1	PET	0,15 mm	20%	9min	0,2m
Celkem 15 h 10 min a 24,5 m						
Fingers						
who_1203_track	5	PET	0,15 mm	20%	33min	1m
who_1301_finger_a_a1	1	PET	0,15 mm	20%	40min	0,8m
who_1302_finger_a_a2	1	PET	0,15 mm	20%	26min	0,6m
who_1303_finger_a_a3	1	PET	0,15 mm	20%	38min	0,8m
who_1401_finger_b_a1	1	PET	0,15 mm	20%	46min	0,9m
who_1402_finger_b_a2	1	PET	0,15 mm	20%	42min	0,9m
who_1403_finger_b_a3	1	PET	0,15 mm	20%	46min	0,9m
who_1501_finger_c_a1	1	PET	0,15 mm	20%	50min	1m
who_1502_finger_c_a2	1	PET	0,15 mm	20%	56min	1,2m
who_1503_finger_c_a3	1	PET	0,15 mm	20%	49min	1m
who_1601_finger_d_a1	1	PET	0,15 mm	20%	46min	0,9m
who_1602_finger_d_a2	1	PET	0,15 mm	20%	42min	0,9m
who_1603_finger_d_a3	1	PET	0,15 mm	20%	46min	0,9m
who_1601_finger_e_a1	1	PET	0,15 mm	20%	50min	1m
who_1602_finger_e_a2	1	PET	0,15 mm	20%	51min	1,1m
who_1603_finger_e_desk	1	PET	0,15 mm	20%	29min	1m
Celkem 13 h 42 min a 18,9 m						
Celkem 87 h 21 min a 345,1m filamentu PET (1,1 kg)						

Tabulka 12 Nastavení jednotlivých dílů

## 9 Rozpis komponentů

### 9.1 Rukavice

Rukavice jsou vyrobeny ze 100% nylonu. Na prsty a dlaň je nanesena vrstva nitrilu s prodyšnou úpravou microfoam s PVC terčíky



Obr. 41 Rukavice [19]

### 9.2 Teflonová hadice PTFE 4x2,5mm

PTFE hadice je vhodná svou velkou odolností a zároveň svou dostupností.



Obr. 42 PTFE hadice [20]

### 9.3 Šroubení se závitem přímé TPC04-M5

Toto šroubení je použito z důvodu snadného spojení s teflonovou hadicí. Tělo je vyrobeno z niklované mosazi.



Obr. 43 Šroubení [21]

## 9.4 Ocelové lanko

Průměr lana 1,25mm

ČSN 024311

## 9.5 Trapézový šroub TR8x8

Trapézový šroub je vhodný pro lineární pohon

## 9.6 Matice s přírubou T8x8

Matice s trapézovým závitem T8x8 se čtyřchodým závitem a přírubou pro pevnější uchycení. Materiál matice je mosaz.



Obr. 44 Matice TR8x8 [22]

## 9.7 Optický senzor

Senzor je vhodný a spolehlivý pro určování koncové polohy.



Obr. 45 Optický senzor [23]

## 9.8 Motor

Napětí 6V

Otáčky 100 RPM

Rozlišení hallova senzoru 11 signálu na otáčku

Maximální účinnost při zátěži 1kg/cm; 80rpm/1,7W/0,5A

Maximální síla při zátěži 3kg/cm/55rpm/2,8W/1,0A

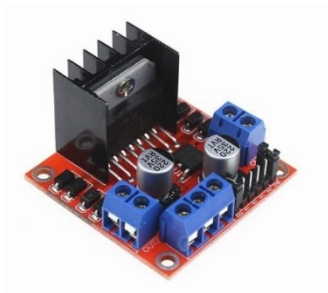
Převodovka 1:75



Obr. 46 Motor 6V [24]

## 9.9 L298N H můstek

H můstek je vhodný pro řízení až dvou DC motorů. Je možné jej napájet až 46 V s proudem 3A.



Obr. 47 L298N H můstek [25]

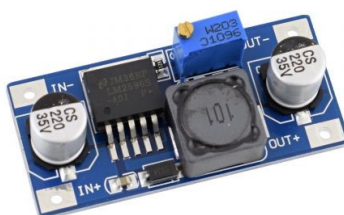
## 9.10 Napájecí modul 3 – 40 V / 3A (Step-down)

Step down je použit z důvodu napájení motorů přes síťový napájecí adaptér s výstupním napětím 9V.

Vstupní napětí 5 – 45V

Výstupní napětí 3V-40V

Výstupní proud 3A



Obr. 48 Step-down [26]

## 9.11 Napájecí adaptér síťový 9V 60mA [27]

Vstupní napětí 240V AC / 50HZ

Výstupní napětí 9V DC

Výstupní proud 0,6A

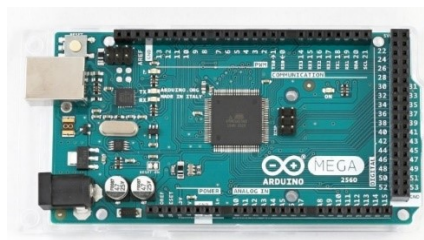
Výstupní výkon 5,4W

## 9.12 Arduino Mega 2560

Jako řídicí jednotka je použita deska Arduino Mega 2560 s mikrokontrolerem ATmega2560

Digitálních vstupů/výstupu 54

Analogových vstupů 16



Obr. 49 Arduino Mega 2560 [28]

## 9.13 Joystick PS

Joystick pro snadné ovládání exoskeletonu. Funguje na principu odečítání analogové hodnoty osy x a y.

Napájení 5V



Obr. 50 Joystick [29]

## 9.14 Kolébkový spínač P-SM101-1B3 [30]

Kolébkkový spínač pro jednoduché zapínání systému

## 9.15 Nepájivé kontaktní pole ZY-60 [31]

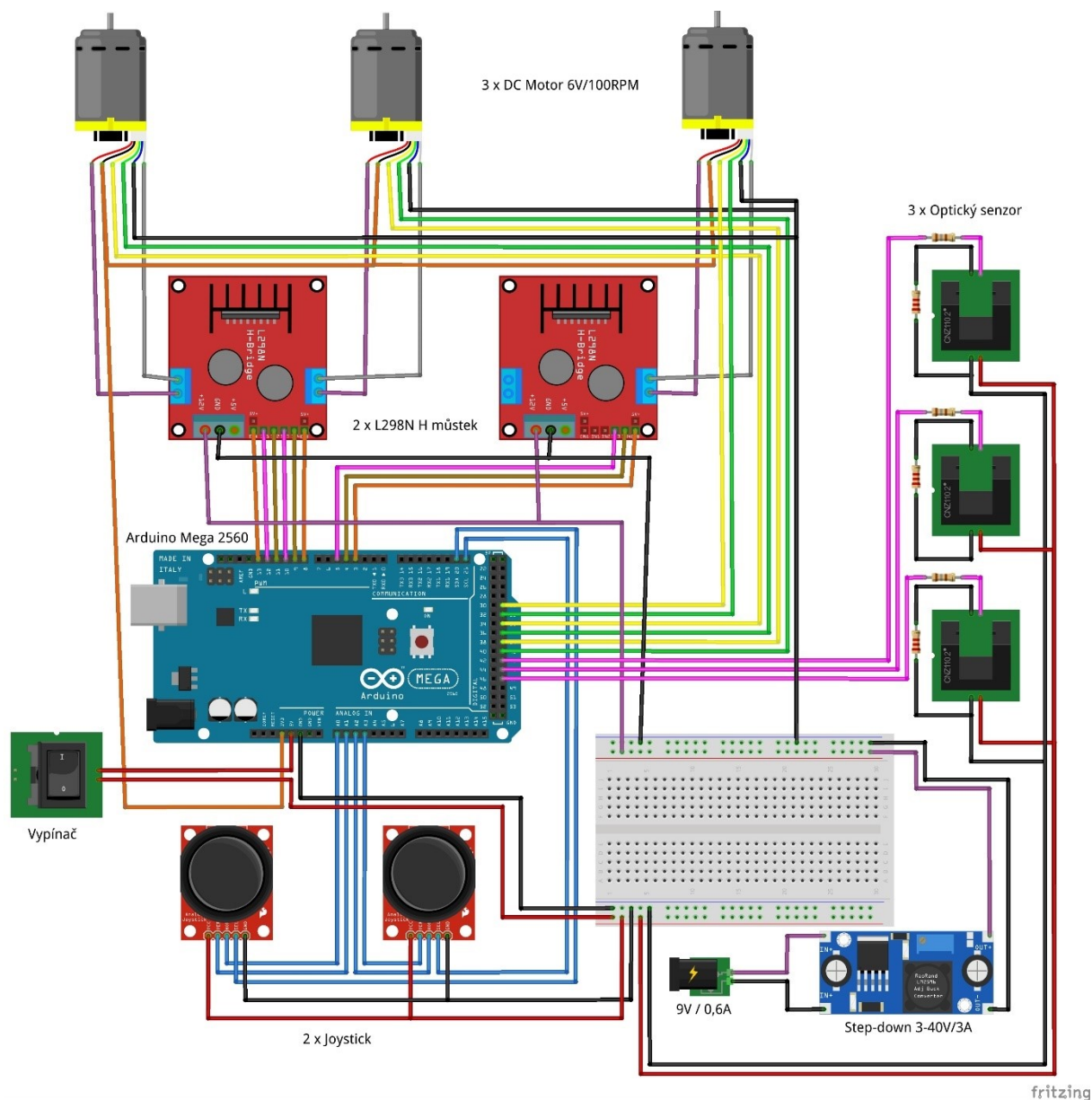
Nepájivé pole je prozatímní řešení pro prototyp.

Pracovní část pole pro 300 pinů, napájecí část pro 100 pinů.

Rozměry 55x82x8,5 mm

## 10 Schéma zapojení

Schéma zapojení je provedeno v softwaru Fritzing Verze 0.9.3, který je vhodný pro svou přehlednost a jednoduchost. Je také vhodný z důvodu široké škály knihovných dílů.



Obr. 51 Schéma zapojení



## 11 Rozpočet

Položka	počet ks	Cena za ks [Kč]	Cena celkem	Dodavatel	Poznamka
Motor	3	250	750	<a href="https://www.aliexpress.com/item/6V-100-210-300RPM-Encoder-Motor-DC-Gear-Motor-New-Arrival/32827252145.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.T0pp2S">https://www.aliexpress.com/item/6V-100-210-300RPM-Encoder-Motor-DC-Gear-Motor-New-Arrival/32827252145.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.T0pp2S</a>	6V/100RPM/Encoder_motor_D C_Gear_Motor
L298N H Bridge	2	88	176	<a href="https://laskarduino.cz/motory-radice/143010-h-mustek-pro-krokovy-motor-l298n-dualni-motorovy-modul.html">https://laskarduino.cz/motory-radice/143010-h-mustek-pro-krokovy-motor-l298n-dualni-motorovy-modul.html</a>	H-můstek L298N
Joystick	2	87	174	<a href="https://arduino-shop.cz/arduino/884-arduino-joystick-ps2-1420494869.html?gclid=EAlaIqobChMI34_A14uG2wIVT77tCh0b_gYIEAQYASABEgI4qfD_BwE">https://arduino-shop.cz/arduino/884-arduino-joystick-ps2-1420494869.html?gclid=EAlaIqobChMI34_A14uG2wIVT77tCh0b_gYIEAQYASABEgI4qfD_BwE</a>	Joystick PS2
Optický senzor	3	35	105	<a href="https://www.postavrobotu.cz/Koncovy-spinac-endstop-pro-3D-tisk-a-CNC-opticky-d1309.htm">https://www.postavrobotu.cz/Koncovy-spinac-endstop-pro-3D-tisk-a-CNC-opticky-d1309.htm</a>	
Arduino Mega 2560	1	1086	1086	<a href="https://www.hwkitchen.cz/arduino-mega-2560/">https://www.hwkitchen.cz/arduino-mega-2560/</a>	
Step-down	1	83	83	<a href="https://www.gme.cz/napajeci-modul-3-40v-3a-step-down">https://www.gme.cz/napajeci-modul-3-40v-3a-step-down</a>	3-40V/3A
Napájecí adaptér	1	139	139	<a href="https://www.gme.cz/napajeci-adapter-sitovy-9v-600ma-5-5-2-1mm-vigan">https://www.gme.cz/napajeci-adapter-sitovy-9v-600ma-5-5-2-1mm-vigan</a>	9V 600mA
Nepájivé pole	1	62	62	<a href="https://www.gme.cz/nepajive-kontakti-pole-zy-60">https://www.gme.cz/nepajive-kontakti-pole-zy-60</a>	ZY-60
Vypínač	1	11	11	<a href="https://www.gme.cz/p-sm101-1b3">https://www.gme.cz/p-sm101-1b3</a>	P-SM101-1B3
Matice TR8x8	1	72	72	<a href="http://www.snailshop.cz/pohybove-srouby-a-matice/2375-matice-s-prirubou-t8x8-mosaz.html">http://www.snailshop.cz/pohybove-srouby-a-matice/2375-matice-s-prirubou-t8x8-mosaz.html</a>	T8x8
Šroub TR8x8	1	130	130	Ferona	TR8x8
PTFE Hadice	5	36,3	181,5	<a href="http://eshop.technoline.cz/teflonove-hadice/459708-teflonova-hadice-cira-ptfe-4x25-cena-za-1m">http://eshop.technoline.cz/teflonove-hadice/459708-teflonova-hadice-cira-ptfe-4x25-cena-za-1m</a>	PTFE 4x2,5
Šroubení	13	15,6	202,8	<a href="http://eshop.technoline.cz/sroubeni-se-zavitem/2703-sroubeni-se-zavitem-prime-tpc04-m5-">http://eshop.technoline.cz/sroubeni-se-zavitem/2703-sroubeni-se-zavitem-prime-tpc04-m5-</a>	TPC04-M5
Ocelové lanko	5	9	45	<a href="http://www.ferona.sk/sk/sortiment/katalog/druhovyrobky/ocelove-lana.html">http://www.ferona.sk/sk/sortiment/katalog/druhovyrobky/ocelove-lana.html</a>	1,25mm průměr
Rukavice	1	35,1	35,1	<a href="https://www.obchodnisa.cz/povrstvene-rukavice-ropa">https://www.obchodnisa.cz/povrstvene-rukavice-ropa</a>	Rukavice velikost L
Spojovací materiál	1	200	200	Ferona	M3
3D Tisk	1,1	599	660	<a href="https://shop.prusa3d.com/en/filament/72-black-petg-filament-1kg.html#">https://shop.prusa3d.com/en/filament/72-black-petg-filament-1kg.html#</a>	
					<b>Celkem 4112,4 Kč</b>

Tabulka 13 Rozpočet

## 12 Závěr

Na základě konzultace s vedoucí rehabilitace a balneoterapie Sanatoria Klimkovice Mgr. Romanou Holaňovou a vedoucím práce Ing. Ladislavem Kárníkem, CSc. byl sestaven požadavkový list pro konstrukci exoskeletonu.

Proces vývoje jednotlivých částí probíhal vždy návrhem prototypu a následným vyrobáním pomocí 3D tiskárny. Na základě otestování funkčnosti byl každý díl následně následně optimalizován do finální podoby.

Při navrhování převodových ústrojí byl celý mechanismus vypočítán a navržen. Po získání potřebných dat procházel vývoj převodového ústrojí opět procesem výroby a následnou optimalizací do výsledné podoby.

Rehabilitační exoskeleton oblasti WHO plní funkci dynamické ortézy s rozsahem pohybu  $45^\circ$  flexe a extenze zápěstí,  $15^\circ$  radiální a ulnární deviace. Prsty jsou ovládány společným pohonem s rozsahem pohybu  $60^\circ$  v kořeni prstů a  $30^\circ$  v jednotlivých kloubech prstů.

Váha exoskeletonu vychází teoreticky 200g, což zajišťuje dostatečný komfort pro operátora,

Výrobní cena exoskeletonu vyšla na 4112,4 Kč kde ovšem není započítán čas tisku, vývoje a také montážní čas. To by mohlo celkovou cenu mnohonásobně zvýšit, ale výše této ceny se může velice lišit.

Celý exoskeleton byl od začátku navrhován se záměrem co nejnížší ceny k poměru účinnosti léčby spasticity, aby byla zajištěna co největší dostupnost pacientům.

Výhodou exoskeletonu oproti stávajícím řešením je provedení dynamické ortézy včetně rehabilitace oblasti zápěstí a snadná přenositelnost celého systému.

## 13 Seznam obrázků

Obr. 1 Statická ortéza [7] .....	13
Obr. 2 Dynamická ortéza [7].....	13
Obr. 3 Schéma klasifikačního systému SCS [7].....	14
Obr. 4 Lokalizace ortéz HK [7].....	15
Obr. 5 Lokalizace kloubu ruky [7] .....	15
Obr. 6 Rozsahy pohybu [9] .....	16
Obr. 7 Příklad spasticity [13] .....	17
Obr. 8 DAHO ortéza [15].....	18
Obr. 9 Saebo ortéza [16].....	18
Obr. 10 Gloreha workstation [17] .....	19
Obr. 11 Rapael [18].....	19
Obr. 12 Kulový kloub.....	21
Obr. 13 Dva lineární pohony.....	22
Obr. 14 Konstrukce prstu s pevnými rameny.....	23
Obr. 15 Konstrukce prstu s lanovým táhlem.....	24
Obr. 16 Kloub zápěstí.....	27
Obr. 17 Řez kloubem zápěstí .....	28
Obr. 18 Hřbetová část kloubu .....	29
Obr. 19 Druhá část kloubu .....	30
Obr. 20 Rozsahy pohybu Extenze a Flexe zápěstí .....	30
Obr. 21 Rozsah pohybu radiální a ulnární deviace .....	31
Obr. 22 Převodové ústrojí pro zápěstí.....	33
Obr. 23 Řez převodovým ústrojím .....	34
Obr. 24 Detailní pohled převodového ústrojí.....	35
Obr. 25 Řez v ose motoru.....	35
Obr. 26 Řez kolmo k ose motoru .....	36
Obr. 27 Řez ve středech horního a dolního disku .....	36
Obr. 28 Maximální potřebný úhel natočení disku.....	36
Obr. 29 Řez v konstrukci prstu.....	37
Obr. 30 Rozsah pohybu v kořeni prstu.....	38
Obr. 31 Rozsah pohybu celého prstu .....	38
Obr. 32 Konstrukce palce.....	39

Obr. 33 Řez konstrukcí palce .....	39
Obr. 34 Převodové ústrjí pro prsty .....	42
Obr. 35 Řez převodovým ústrojím pro prsty.....	42
Obr. 36 Vniřní část převodového ústrojí pro prsty.....	43
Obr. 37 Exoskeleton WHO .....	44
Obr. 38 Box .....	45
Obr. 39 Vnitřní uspořádání boxu.....	46
Obr. 40 Detailnější pohled na box.....	46
Obr. 41 Rukavice [19].....	49
Obr. 42 PTFE hadice [20] .....	49
Obr. 43 Šroubení [21].....	49
Obr. 44 Matice TR8x8 [22].....	50
Obr. 45 Optický senzor [23].....	50
Obr. 46 Motor 6V [24] .....	50
Obr. 47 L298N H můstek [25] .....	51
Obr. 48 Step-down [26].....	51
Obr. 49 Arduino Mega 2560 [28].....	52
Obr. 50 Joystick [29].....	52
Obr. 51 Schéma zapojení.....	53

## 14 Seznam tabulek

Tabulka 1 Ashworthova škála [12] .....	17
Tabulka 2 Požadavkový list .....	20
Tabulka 3 Kriteriační analýza kulového kloubu.....	21
Tabulka 4 Kriteriační analýza dvou lineárních pohonů .....	22
Tabulka 5 Analýza prstu s pevnými rameny .....	23
Tabulka 6 Analýza prstu s lanovým táhlem .....	24
Tabulka 7 Analýza elektrického pohonu.....	25
Tabulka 8 Analýza pneumatického pohonu .....	25
Tabulka 9 Analýza SMA wire.....	26
Tabulka 10 Výpočet pohonu pro zápěstí.....	33
Tabulka 11 Výpočet pohonu pro prsty .....	41
Tabulka 12 Nastavení jednotlivých dílu.....	48
Tabulka 13 Rozpočet.....	54

## 15 Seznam použité literatury

- [1] KÁRNÍK, L. *Servisní roboty*. VŠB-TU Ostrava, 2004, 144s. ISBN 80-248-6
- [2] KÁRNÍK, L.-KNOFLÍČEK, R.-MARCINCIN, J. N. *Mobilní roboty*. Opava: MÁRFY SLEZSKO, 2000. 210 s. ISBN 80-902746-2-5.
- [3] MENZEL, P. – D’ALUSIO, F. *Robo sapiens: evolution of a new species*. USA, New York, 2000. 239 p. ISBN 0-262-13382-2.
- [4] SKARUPA, J. – MOSTÝN, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. Košice: Viena Košice, 2002. 190s. ISBN 80-88922-55-0.
- [5] KOLÍBAL, Z a kol. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. I. vydání. Havlíčkův Brod: VUTIUM, 2016, 786 s. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [6] KÁRNÍK, L. – MARCINČIN, J. N. *Biorobotická zařízení*. Opava: MÁRFY SLEZSKO, 1999. 184 s. ISBN 80-902746-0-9.
- [7] KRAWCZYK, Petr a Jiří ROSICKÝ. *Ortotika 4: studijní opora*. Ostrava: Ostravská univerzita, 2014. ISBN 978-80-7464-617-1
- [8] DUNGL, Pavel. *Ortopedie*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 9788024743578.
- [9] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.crossfitinvictus.com/blog/simple-solutions-for-poor-wrist-mobility/>
- [10] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.pumpyprozivot.cz/zivot-s-pumpou/spasticita>
- [11] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://www.csnn.eu/ceska-slovenska-neurologie-clanek/mechanizmy-spasticity-a-jeji-hodnoceni-40575?confirm\\_rules=1](http://www.csnn.eu/ceska-slovenska-neurologie-clanek/mechanizmy-spasticity-a-jeji-hodnoceni-40575?confirm_rules=1)
- [12] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://www.csnn.eu/ceska-slovenska-neurologie-clanek/mechanizmy-spasticity-a-jeji-hodnoceni-40575?confirm\\_rules=1](http://www.csnn.eu/ceska-slovenska-neurologie-clanek/mechanizmy-spasticity-a-jeji-hodnoceni-40575?confirm_rules=1)
- [13] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://lioresal.com/severe-spasticity/>
- [14] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://www.hc-vsetin.cz/ftk/semi/baka\\_kru1.htm](http://www.hc-vsetin.cz/ftk/semi/baka_kru1.htm)
- [15] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.sanomed.cz/e-shop/individualni-proteticke-pomucky/daho-system-ortez-ruky/daho-1>
- [16] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://saebo.cz/>

- [17] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.btl.cz/produkty-porkocile-rehabilitacni-systemy-gloreha>
- [18] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://madisson.cz/cz/index.php?rapael-1>
- [19] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.obchodnisa.cz/povrstvene-rukavice-napa>
- [20] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://eshop.technoline.cz/teflonove-hadice/459708-teflonova-hadice-cira-ptfe-4x25-cena-za-1m>
- [21] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://eshop.technoline.cz/sroubeni-se-zavitem/2703-sroubeni-se-zavitem-prime-tpc04-m5->
- [22] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.snailshop.cz/pohybove-srouby-a-matice/2375-matice-s-prirubou-t8x8-mosaz.html>
- [23] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.postavrobota.cz/Koncovy-spinac-endstop-pro-3D-tisk-a-CNC-opticky-dl309.htm>
- [24] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/6V-100-210-300RPM-Encoder-Motor-DC-Gear-Motor-Promotion>
- [25] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://laskarduino.cz/motory-radice/143010-h-mustek-pro-krokovy-motor-l298n-dualni-motorovy-modul.html>
- [26] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/napajeci-modul-3-40v-3a-step-down>
- [27] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/napajeci-adapter-sitovy-9v-600ma-5-5-2-1mm-vigan>
- [28] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.hwkitchen.cz/arduino-mega-2560/>
- [29] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://arduino-shop.cz/arduino/884-arduino-joystick-ps2-1420494869.html?gclid=EAIaIQobChMI34\\_A14uG2wIVT77tCh0b\\_gYYEAQYASABEgJ4qfD\\_BwE](https://arduino-shop.cz/arduino/884-arduino-joystick-ps2-1420494869.html?gclid=EAIaIQobChMI34_A14uG2wIVT77tCh0b_gYYEAQYASABEgJ4qfD_BwE)
- [30] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/p-sm101-1b3>
- [31] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/nepajive-kontaktnei-pole-zy-60>
- [32] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://shop.sdp-si.com/catalog/product/?id=A\\_1C\\_5MYH08RC](http://shop.sdp-si.com/catalog/product/?id=A_1C_5MYH08RC)
- [33] [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://shop.sdp-si.com/catalog/product/?id=KBG0.8-20R1>

## 16 Seznam příloh

### Výkresová dokumentace

Sestava exoskeleton	WHO_1000_WRIST
Podsestava kloub 1	WHO_1100_WRIST_01_RH
Podsestava kloub 2	WHO_1100_WRIST_02_RH
Sestava Box	BOX_5000_BOX
Sestava převodové ústrojí zápěstí	GEAR_3000_WRIST_RH
Sestava převodové ústrojí prsty	GEAR_4000_FINGERS

### Přiložené CD

Model exoskeleton Creo Parametric 3.0

Model exoskeleton STL

Diplomová práce.pdf

Výkresová dokumentace.pdf